



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Aprendizaje de habilidades perceptivo-motoras: Efectos de la edad y el ejercicio

Blai Ferrer Uris

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



**Aprendizaje de habilidades
perceptivo-motoras:
Efectos de la edad y el ejercicio**

Blai Ferrer Uris
Tesis doctoral-2017

UNIVERSITAT DE BARCELONA

Facultat d'Educació

INSTITUT NACIONAL D'EDUCACIÓ FÍSICA DE CATALUNYA

Centre de Barcelona

Programa de Doctorat

Activitat Física, Educació Física i Esport

Aprendizaje de habilidades perceptivo-motoras:

Efectos de la edad y el ejercicio

Tesi doctoral presentada per:

Blai Ferrer Uris

Dirigida per:

Dra. Rosa Maria Angulo Barroso i Dr. Albert Busquets Faciabén

Tutoritzada per:

Dra. Rosa Maria Angulo Barroso

Per optar al títol de doctor per la Universitat de Barcelona

Barcelona 2017

Als meus pares, Assumpta i Pere,
perquè des de petit sempre m'heu ajudat i encoratjat en els meus estudis.

A la Sònia i l'Ona,
perquè sempre hi sou, i tinc la certesa que hi sereu quan us necessiti.

Aquesta tesi ha estat realitzada gràcies al suport de l'Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC). En Blai Ferrer Uris ha rebut el suport d'una beca predoctoral concedida dins del marc dels ajuts per la contractació de personal investigador novell de l'INEFC (PRE/2623/2013).

Agraïments

A la meva directora i tutora de tesi Dra. Rosa Angulo Barroso, per ser l'artífex i impulsora d'aquesta tesi doctoral, tant en la proximitat com des de la distància. M'has transmès el teu saber-fer científic, m'has acollit a casa teva i has dedicat més temps del que segurament podies a aquesta tesi doctoral. Tota la feina realitzada encaixa i cobra una major dimensió i importància gràcies a la teva tutela.

Al meu director de tesi Dr. Albert Busquets Faciabén, perquè sense un Batman no podria haver-hi un Robin. Gràcies per compartir el teu coneixement científic amb mi i estar sempre disponible per ajudar-me al llarg de tot el procés. Gràcies també per tots els moments compartits, més enllà de la figura de director, per mi has estat també un amic.

Sònia, gràcies per ser al meu costat durant tot aquest procés. El mèrit d'aquesta tesi és compartit entre tots dos. Sense el teu amor i el teu suport, tota aquesta feina no hauria estat possible.

Ona, nascuda en els compassos finals d'aquesta tesi, has donat un nou sentit a la meua vida. Sense saber-ho, has sigut la principal impulsora i motivació per posar el punt i final a aquest treball. Espero poder gaudir d'aquest èxit, i de molts més, amb tu.

Als meus pares, qui m'han educat per ser la persona que sóc avui. Ells han estat i són el meu model de vida. És impossible poder retornar-los tot el que han fet per mi. Espero que aquestes paraules i la dedicatòria de la tesi puguin ser, almenys, reflex d'una petita part del meu agraïment cap a vosaltres.

Al meu germà Roger, qui m'ha ensenyat el significat de la paraula compartir i m'ha inspirat amb els seu esforç constant i els seus èxits acadèmics. Sé que sempre tindrè el teu suport incondicional.

Vull agrair el suport de la institució de la que he format part durant molts més anys dels que comprèn aquesta tesi doctoral, el centre de Barcelona de l'Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya. Aquí m'he format com a estudiant, com a treballador, com a investigador i com a persona. El mèrit d'aquesta formació, és de tots els treballadors que formen la "família" INEFC Barcelona. Gràcies a tots i totes els que heu posat el vostre gra de sorra.

Entre totes les persones amb qui he conviscut durant aquests anys a l'INEFC de Barcelona, full fer un especial agraïment a:

Dr. Alfredo Irurtia Amigó, per ser la persona qui em va introduir en el món de la recerca i em va encoratjar a fer la meva primera presentació a un congrés.

Dr. Michel Marina Evrard, per contribuir de forma permanent en la meva formació des dels diferents rols que exerceix: professor, investigador i President del Club Esportiu INEF Barcelona. Vas ser tu, Michel, qui després d'haver encarat una via professional molt diferent em vas reenganxar al món de la recerca i em vas convidar a emprendre el camí del doctorat juntament amb la Rosa i l'Albert.

Al Dr. Rafael Tarragó García, per mostrar-me el valor de la feina ben feta en el meu primer any com a treballador de l'INEFC Barcelona.

Al Jordi Borrell i Font, per la confiança depositada en mi i pels coneixements que em va ajudar a adquirir, tant a nivell informàtic com personal.

A la Maribel Pérez Ballano, sense qui possiblement m'hauria ofegat en el mar burocràtic del procés de dipòsit i defensa de tesi.

Al Dr. Miguel Fernández del Olmo y la Dra. Virginia López Alonso (Popi). Nos abristeis de par en par las puertas del INEF A Coruña y nos ayudasteis a poder poner en marcha este proyecto. Sin vosotros, esta tesis no habría sido posible.

A la Dra. Jennifer L. Romack, qui ens va acollir al laboratori de la California State University Northridge (CSUN). Jennifer, em vas contagiar amb el teu afany per la recerca, la teva fortalesa, alegria i actitud positiva. Guardaré els dies que vam compartir en un racó especial de la meva memòria.

A la Conchi Calvo, la Marta i la Dolores de l'Escola Seat, per ajudar-me a poder realitzar el meu estudi en el si de l'escola i facilitar-me tots els espais i recursos materials que necessitava.

A tot el personal de la "Our Community School" (Los Angeles, Califòrnia), per obrir-nos les portes a la seva escola i poder fer realitat una part important d'aquest projecte.

Als participants dels diversos estudis i centres on hem realitzat les proves: INEFC Barcelona, Escola Seat i Ours Community School. Sense la seva col·laboració no hauria estat possible realitzar els estudis que conformen aquesta tesi doctoral.

Als companys i companyes del laboratori de fisiologia de l'INEFC Barcelona, en especial al Pep Ripoll, el Diego Xaverri, l'Agne Slapsinskaite i Gerard Carmona. Amb ells he pogut créixer i compartir coneixements i experiències que han fet especial el procés de tesi doctoral. També a la Priscila Torrado, a qui aquest agraïment s'estén a la seva amistat i moments d'alegria i patiment compartits dins i fora de l'INEFC.

Per últim, vull agrair a totes aquelles persones i amics qui, directa o indirectament m'han ajudat en la tesi doctoral i la meva formació.

Esta tesis está respaldada por la siguiente publicación:

Ferrer-Uris B, Busquets A, Lopez-Alonso V, Fernandez-del-Olmo M, Angulo-Barroso R
(2017) Enhancing consolidation of a rotational visuomotor adaptation task through
acute exercise. PLOS ONE 12(4): e0175296.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175296>

Esta publicación puede ser encontrada en el apartado de ANEXOS de esta tesis
doctoral.

Resumen

Desde que nacemos, aprendemos y reaprendemos habilidades y movimientos que perdurarán a lo largo de nuestra vida. Especialmente durante la infancia, se adquieren gran parte de estos aprendizajes motores, los cuales tendrán un impacto importante en nuestro desarrollo motor (Haywood & Getchell, 2014). Por este motivo, se considera que la estimulación de la capacidad de aprendizaje motor podría tener un impacto importante durante la etapa de la infancia.

En los últimos años, se ha puesto en evidencia cómo el enriquecimiento del entorno a partir de la práctica regular de ejercicio físico (ejercicio a largo plazo) puede dar como resultado una mejora en el rendimiento de la función cognitiva, tanto en animales (Vaynman, Ying, & Gomez-Pinilla, 2004) como en humanos (Smith et al., 2010). Así mismo, la práctica de una única sesión de ejercicio (ejercicio agudo) también ha mostrado un efecto positivo en la estimulación de la función cognitiva tanto de adultos (Chang, Labban, Gapin, & Etnier, 2012) como de niños (Tompsonski, McCullick, Pendleton, & Pesce, 2015).

Recientemente, se ha hecho un importante avance en relación al conocimiento de los efectos del ejercicio físico como facilitador del aprendizaje motor en adultos (Taubert, Villringer, & Lehmann, 2015). Los beneficios de este tipo de intervención fueron observados principalmente sobre los procesos de consolidación motora cuando la intensidad del ejercicio era elevada y tenía una duración de veinte minutos aproximadamente (Mang, Snow, Campbell, Ross, & Boyd, 2014; Roig, Skriver, Lundbye-Jensen, Kiens, & Nielsen, 2012; Thomas, Johnsen, et al., 2016). Aun así, los ensayos

clínicos realizados hasta la fecha se han limitado al estudio de tareas motoras sencillas, centradas habitualmente en movimientos monoarticulares y en una única dirección. Además, en niños, a pesar de que recientemente se han observado beneficios similares a los de los adultos sobre los procesos de consolidación motora (Lundbye-Jensen, Skriver, Nielsen, & Roig, 2017), existe un volumen de evidencia muy reducido en relación a los efectos del ejercicio sobre el proceso de aprendizaje motor.

El objetivo general de la presente tesis doctoral fue estudiar el efecto del ejercicio intenso sobre el aprendizaje de una tarea de adaptación visuomotora de tipo rotacional (movimientos poliarticulares y en dos direcciones) tanto en población adulta como infantil. Para ello, se realizaron tres estudios consecutivos en los cuales se evaluó: (a) el efecto del ejercicio sobre la adaptación y consolidación motora en adultos (estudio 1) y niños (estudio 2 y 3), (b) el posible efecto del orden de presentación entre la tarea motora y el ejercicio (estudios 1 y 2) y (c) el efecto de la duración del ejercicio (ejercicio largo: 13 minutos; ejercicio corto: 5 minutos) sobre la adaptación y consolidación de la tarea motora en niños (estudio 3).

En los tres estudios realizados se observó, tanto en adultos como en niños, una mejora en el proceso de consolidación de la tarea motora como consecuencia del ejercicio. Además, mientras que los adultos presentaron una facilitación de la consolidación motora una hora después de la práctica inicial en la tarea, los niños presentaron efectos mayores y mantenidos durante un periodo de tiempo mayor (hasta siete días después de la práctica inicial en la tarea). Así, parece ser que los niños podrían beneficiarse en mayor medida que los adultos de la práctica de ejercicio.

En cuanto al orden de presentación del ejercicio y la tarea motora, si bien en los adultos se observaron resultados similares entre una estrategia de presentación u otra (estudio 1), en los niños parece ser que los mejores beneficios sobre la consolidación se obtuvieron cuando el ejercicio fue presentado justo antes de la práctica en la tarea motora (estudio 2). Por último, incluso cuando la duración del ejercicio fue corta (5 minutos) se observaron mejoras en la consolidación de la tarea motora, aunque los mejores efectos fueron hallados cuando la duración del ejercicio fue larga (13 minutos).

Los estudios presentados en esta tesis doctoral añaden nueva evidencia en torno al efecto positivo del ejercicio sobre la consolidación motora tanto en adultos como en niños. Especialmente en relación a los niños, se muestra cómo la realización de ejercicio antes de la práctica de la tarea motora tiene mayores efectos sobre los procesos de consolidación que la realización del ejercicio después. Además, también se constatan los beneficios de una sesión de ejercicio de una duración de tan solo cinco minutos sobre el aprendizaje motor. Así, los resultados de esta tesis doctoral ponen en evidencia cómo el uso del ejercicio intenso puede facilitar el aprendizaje motor tanto de adultos como de niños. También se propone cómo este tipo de estrategias para facilitar el aprendizaje motor podrían ser utilizadas incluso en entornos donde existan restricciones de tiempo, como el colegio o el ámbito deportivo de base.

Abstract

From birth, we learn and relearn new skills and movements that will endure a life time. Specially during childhood, a great portion of these new motor skills are learned, having this learning process a great impact in our motor development (Haywood & Getchell, 2014). For this reason, enhancing motor learning capacity could be of high importance during childhood.

In recent years, it has been observed that enriched environments through regular exercise practice (long term exercise) may result in the stimulation of the cognitive function performance, both in animals (Vaynman et al., 2004) and human (Smith et al., 2010). In addition, a single exercise session (acute exercise) has also shown positive effects on the cognitive function of adult (Chang et al., 2012) and children (Tompsonski, McCullick, Pendleton, et al., 2015).

Recently, great advancements have been made towards the study of how acute exercise can facilitate motor learning in adults (Taubert et al., 2015). Exercise benefits have been mainly observed on the motor memory consolidation process and specially when exercise was of high intensity and a duration around 20 minutes (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012; Thomas, Johnsen, et al., 2016). However, controlled trials examining this topic have utilized simple motor tasks, focused on monoarticular movements and movements performed in a single direction. Moreover, although a recent study has observed results similar to those presented in the adult population (Lundbye-Jensen et al., 2017), there still exists very limited evidence examining the exercise effect on motor learning in children.

The aim of this doctoral thesis was to study the effect of acute intense exercise on the learning process of a rotational visuomotor adaptation task (comprising poliarticular movements in two different directions) in adult and children populations. To do so, we conducted three consecutive studies where we assessed: (a) the effect of exercise on the motor adaptation and consolidation processes in adults (study 1) and children (studies 2 and 3), (b) the possible effect of the presentation order of the motor task and the exercise session (studies 1 and 2), and (c) the effect of the exercise duration (long exercise: 13 minutes; short exercise: 5 minutes) on the adaptation and consolidation of the motor task in children (study 3).

In these three conducted studies, both in adult and children, we observed an improvement of the consolidation process of the motor task due to exercise. Moreover, while adults presented a facilitation of the motor consolidation after 1 hour of first practicing the motor task, children presented greater and more sustained effects of the exercise on their motor consolidation, showing consolidation enhancements even 7 days after. Therefore, it seems that children could benefit from exercise even more than adults. In relation to the presentation order of the motor task and the exercise session, while adults presented similar results independent of the order (study 1), children showed greater effects when the exercise session was presented immediately before the motor task (study 2). Lastly, even when the exercise session was short (5 minutes), children's motor consolidation showed some improvements, although larger effects were seen when the exercise duration was long (13 minutes).

The studies presented in this doctoral thesis add new evidence in relation to the positive effects of exercise on motor memory consolidation in adult and children populations. Especially in children, new evidence is presented about how exercising before the motor task practice greatly enhances motor consolidation compared to exercising after. Moreover, we also introduce new evidence about the positive effect of an exercise session as short as 5 minutes on motor consolidation. Therefore, this doctoral thesis results show how exercise could possibly be used to stimulate adult and, specially, children's motor learning. Furthermore, it is also proposed how these learning-enhancing strategies could even be applied to environments where time restrictions exist, like school or sports practice settings.

Abreviaciones

20mSRT	Test de carrera lanzada en 20 m
AD	Set de adaptación de la tarea rVMA
BA	Set de evaluación basal en la tarea rVMA
BDNF	Factor neurotrófico derivado del cerebro
BMI	Índice de masa corporal
CON	Grupo que no realizó el iE
DCD	Trastorno del desarrollo de la coordinación
EX-rVMA	Grupo que realizó el iE antes de la tarea motora
FAM	Set de práctica de familiarización en la tarea rVMA
HR	Frecuencia cardíaca
IDE	Error direccional inicial
iE	Ejercicio intenso
IPAQ	Cuestionario internacional de actividad física
LONG	Grupo que realizó el iE largo antes de la tarea rVMA
LTP	Potenciación a largo plazo
MT	Tiempo de movimiento
PAQ-C	IPAQ en su versión para niños
PARQ	Cuestionario de aptitud para la práctica de actividad física
PARQ-C	PARQ en su versión para niños
RL	Ratio de aprendizaje
RMSE	Raíz del promedio de los errores al cuadrado
RT	Tiempo de reacción
RT1	Set de retención de la tarea rVMA 1 hora después de la adaptación
RT24	Set de retención de la tarea rVMA 24 horas después de la adaptación
RT7D	Set de retención de la tarea rVMA 7 días después de la adaptación
rVMA	Adaptación Visuomotora rotacional

rVMA-EX	Grupo que realizó el iE después de la tarea motora
SHORT	Grupo que realizó el iE corto antes de la tarea rVMA
TD	Distancia recorrida en la tarea rVMA
TONI	Test de inteligencia no verbal
TONI-IQ	Cociente intelectual calculado a través del test TONI
VO ₂ max	Consumo de oxígeno máximo

Índice de contenidos

AGRAÏMENTS	6
RESUMEN	11
ABSTRACT	14
ABREVIACIONES	17
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	28
1.1 APRENDIZAJE MOTOR.....	29
1.1.1 <i>Adaptación y consolidación de la habilidad motora</i>	29
1.1.2 <i>La evaluación del aprendizaje motor</i>	32
1.1.3 <i>Los paradigmas de aprendizaje motor</i>	37
1.2 DESARROLLO MOTOR Y APRENDIZAJE MOTOR: DIFERENCIAS ENTRE NIÑOS Y ADULTOS	40
1.2.1 <i>Relación entre el desarrollo motor y el aprendizaje motor</i>	40
1.2.2 <i>Efecto del desarrollo motor en la tarea de Adaptación Visuomotora rotacional (rVMA)</i>	41
La tarea rVMA	42
El desarrollo motor y su influencia en la adaptación de la tarea rVMA	43
1.2.3 <i>Estimulación del aprendizaje motor: plasticidad neuronal y entornos enriquecidos</i>	45
1.3 EFECTO DEL EJERCICIO SOBRE LA FUNCIÓN CEREBRAL Y EL APRENDIZAJE DECLARATIVO	46
1.3.1 <i>Efectos de la práctica de ejercicio a largo plazo</i>	47
Efectos en animales.....	47
Efectos en humanos adultos	48
Efectos en humanos de edad infantil y pre-adolescentes.....	48
1.3.2 <i>Efectos de la práctica de ejercicio agudo</i>	49
Efectos en adultos	49
Efectos en humanos de edad infantil y pre-adolescentes.....	50
1.4 EFECTOS DEL EJERCICIO AGUDO SOBRE EL APRENDIZAJE MOTOR DE ADULTOS Y NIÑOS	51
1.4.1 <i>Efectos en adultos</i>	51
1.4.2 <i>Efectos en niños</i>	54

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	58
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	59
2.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	59
2.2.1 Estudio 1	59
2.2.2 Estudio 2	59
2.2.3 Estudio 3	60
2.2.4 Análisis comparativo de los estudios 1 y 2.....	60
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	62
3.1 PARTICIPANTES	63
3.2 APROBACIÓN ÉTICA DE LA INVESTIGACIÓN	64
3.3 EJERCICIO INTENSO (IE)	64
3.4 TAREA DE ADAPTACIÓN VISUOMOTORA ROTACIONAL (RVMA)	66
3.5 PROCEDIMIENTO GENERAL	68
3.6 VARIABLES.....	69
CAPÍTULO 4: ESTUDIO 1 - ENHANCING CONSOLIDATION OF A ROTATIONAL VISUOMOTOR ADAPTATION TASK THROUGH ACUTE EXERCISE	74
4.1 ABSTRACT.....	75
4.2 INTRODUCTION.....	76
4.3 MATERIALS AND METHODS.....	79
4.3.1 Participants.....	79
4.3.2 The rVMA task	80
4.3.3 The iE bout	81
4.3.4 Procedure.....	82
4.3.5 Data reduction	85
4.3.6 Variables	86
4.3.7 Data analysis	87
4.4 RESULTS.....	89

4.5	DISCUSSION	96
4.6	CONCLUSIONS	103
4.7	ACKNOWLEDGEMENTS	104
4.8	SUPPORTING INFORMATION	105

CAPÍTULO 5: ESTUDIO 2 - EFFECTS OF A SINGLE BOUT OF INTENSE ENDURANCE EXERCISE ON THE ADAPTATION AND RETENTION OF A PERCEPTUAL-MOTOR TASK IN CHILDREN 106

5.1	ABSTRACT.....	107
5.2	INTRODUCTION.....	108
5.3	MATERIALS AND METHODS.....	111
5.3.1	<i>Procedure.....</i>	<i>112</i>
5.3.2	<i>Rotational visuomotor adaptation task.....</i>	<i>114</i>
5.3.3	<i>Intense exercise.....</i>	<i>116</i>
5.3.4	<i>Data reduction.....</i>	<i>116</i>
5.3.5	<i>Variables.....</i>	<i>116</i>
5.3.6	<i>Data analysis.....</i>	<i>118</i>
5.4	RESULTS.....	119
5.5	DISCUSSION	125
5.6	CONCLUSIONS	133
5.7	ACKNOWLEDGMENTS.....	133

CAPÍTULO 6: ESTUDIO 3 - ENHANCING CHILDREN’S MOTOR CONSOLIDATION THROUGH ACUTE INTENSE EXERCISE: EFFECTS OF DIFFERENT EXERCISE DURATIONS 134

6.1	ABSTRACT.....	135
6.2	INTRODUCTION.....	136
6.3	MATERIALS AND METHODS.....	140
6.3.1	<i>Procedure.....</i>	<i>143</i>
6.3.2	<i>Rotational visuomotor adaptation task.....</i>	<i>146</i>
6.3.3	<i>Intense exercise.....</i>	<i>146</i>
6.3.4	<i>Data reduction.....</i>	<i>147</i>

6.3.5	<i>Variables</i>	148
6.3.6	<i>Data analysis</i>	149
6.4	RESULTS	151
6.5	DISCUSSION	157
6.6	CONCLUSIONS	162
CAPÍTULO 7: EFECTOS DEL EJERCICIO SOBRE LA ADAPTACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA TAREA RVMA:		
LA IMPORTANCIA DE LA EDAD		
7.1	INTRODUCCIÓN	165
7.2	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	166
7.3	RESULTADOS	168
7.3.1	<i>Características de los participantes</i>	168
7.3.2	<i>Rendimiento basal de adultos y niños en la tarea rVMA</i>	168
7.3.3	<i>Comparación del efecto del ejercicio sobre la adaptación motora entre adultos y niños</i>	170
7.3.4	<i>Comparación del efecto del ejercicio sobre la consolidación motora entre adultos y niños</i>	172
7.4	DISCUSIÓN	178
7.4.1	<i>Rendimiento basal de adultos y niños en la tarea rVMA</i>	178
7.4.2	<i>Efectos del ejercicio sobre la adaptación de la tarea rVMA en adultos y niños</i>	179
7.4.3	<i>Efectos del ejercicio sobre la consolidación de la tarea rVMA en adultos y niños</i>	181
7.4.4	<i>Efecto del orden de presentación del ejercicio y la tarea motora sobre la consolidación de la tarea rVMA en adultos y niños</i>	187
7.5	CONCLUSIONES DE LA COMPARATIVA ENTRE LOS ESTUDIOS 1 Y 2 DE LA TESIS DOCTORAL	188
CAPÍTULO 8: DISCUSIÓN GENERAL, CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES PRÁCTICAS Y LÍNEAS DE FUTURO		
8.1	DISCUSIÓN GENERAL	191
8.1.1	<i>Efectos del iE sobre el aprendizaje de la tarea rVMA en adultos</i>	191
	Efectos del ejercicio sobre el proceso de adaptación	191
	Efectos del ejercicio sobre el proceso de consolidación	192
	Efectos del orden de presentación del ejercicio y la tarea motora	194

8.1.2 Efectos del iE sobre el aprendizaje de la tarea rVMA en niños	195
Efectos del ejercicio sobre el proceso de adaptación	195
Efectos del ejercicio sobre el proceso de consolidación	196
Efectos del orden de presentación del ejercicio y la tarea motora	197
Efectos de la duración del ejercicio	198
8.2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS	199
8.2.1 Conclusiones	199
8.2.2 Recomendaciones prácticas.....	199
8.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	200
BIBLIOGRAFÍA	204
ANEXOS	220

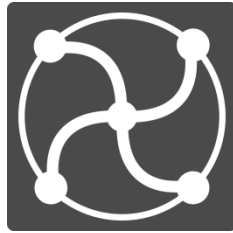
Índice de figuras

Figura 1.1. Sistema de bucle cerrado para el control y el aprendizaje motor.....	31
Figura 1.2. Evaluación de los procesos de adaptación y consolidación motora.....	36
Figura 1.3. Representación esquemática de una tarea del tiempo de reacción en serie.....	38
Figura 1.4. Representación esquemática de una tarea de Adaptación Visuomotora	39
Figura 1.5. Representación esquemática de la tarea de Adaptación Visuomotora rotacional (rVMA).....	43
Figura 3.1. Resumen de los objetivos, estudios, grupos y procedimientos realizados dentro del marco de la tesis doctoral	69
Figura 3.2. Representación esquemática de las variables de error computadas	72
Figura 4.1. The rotational visuomotor adaptation task (rVMA)	81
Figura 4.2. Schematic overview of the experimental procedure	84
Figura 4.3. Early and late rVMA cursor trajectories during the adaptation set.....	85
Figura 4.4. Comparison of the RL for the rVMA during the adaptation set between participants who did and did not perform exercise before the rVMA	92
Figura 4.5. Correlation between error performance at the end of the adaptation and the start of the RT1h of the rVMA.....	93
Figura 4.6. Error values among groups for the rVMA during the retention sets.....	95
Figura 4.7. Exercise effects on motor adaptation and motor retention 1h	105
Figura 5.1. Study procedure	115
Figura 5.2. Mean rate of learning during adaptation.	122
Figura 5.3. Error performance during short, mid and long retentions.	124
Figura 6.1. Study procedure	144
Figura 6.2. Group average rate of learning during the adaptation set.....	155
Figura 6.3. Group average error performance during retention sets of the rotational visuomotor task (rVMA)	156
Figura 7.1. Promedios del error y la ratio de aprendizaje de las cohortes y grupos de edad durante el set AD de la tarea rVMA.....	172
Figura 7.2. Promedio del error de las retenciones para la interacción de los factores grupo y edad	177

Índice de tablas

Tabla 3.1. Características de los participantes	65
Tabla 4.1. Group characteristics	80
Tabla 4.2. Mean and SD performance values on the rotational visuomotor adaptation task (rVMA) for each group and set.	90
Tabla 5.1. Groups characteristics	112
Tabla 5.2. Mean raw values of the performance variables on the rotational visuomotor adaptation task (rVMA) for each group and set.	120
Tabla 6.1. Groups characteristics	142
Tabla 6.2. Mean and SD performance values on the rotational visuomotor adaptation task (rVMA) for each group, site and set	153
Tabla 7.1. Resultados del análisis del set BA de la tarea rVMA	169
Tabla 7.2. Resultados del análisis del set AD de la tarea rVMA.....	171
Tabla 7.3. Resultados del análisis de las variables descriptivas del movimiento de los sets RT1, RT24 y RT7d de la tarea rVMA	175
Tabla 7.4. Resultados del análisis de las variables de error de los sets RT1, RT24 y RT7d de la tarea rVMA	176

Capítulo 1: Introducción



1.1 Aprendizaje motor

El proceso de aprendizaje motor puede estar influenciado por muchos factores como, por ejemplo, la experiencia previa en la habilidad y la dificultad de esta misma, entre otros. En esta tesis doctoral nos hemos centrado en el estudio de dos de los factores que pueden afectar el aprendizaje motor: la práctica de ejercicio agudo y la edad de la persona. Con esta finalidad, el objeto de estudio de esta tesis doctoral ha sido una tarea perceptual-motora la cual requiere un proceso de adaptación visuomotora.

Para profundizar en el entendimiento del proceso de aprendizaje perceptivo-motor, esta tesis doctoral utiliza el marco teórico y neurológico propuesto en la revisión de Ramnani (2006). En dicho marco teórico, el proceso de aprendizaje depende de la experiencia en la habilidad y se fundamenta en dos procesos esenciales: (1) la generación de un modelo interno de la habilidad motora y (2) la generación de *feedbacks* a través del movimiento en sí mismo.

A continuación, veremos con más detalle cómo podemos entender el aprendizaje de una habilidad motora, sus procesos de adaptación y consolidación, bajo el prisma del marco teórico mencionado anteriormente.

1.1.1 Adaptación y consolidación de la habilidad motora

Para el control de nuestros movimientos, la teoría del control motor ha adoptado como eje central el concepto del modelo interno (Ramnani, 2006). Podemos referirnos a este modelo interno como la representación neural adquirida a través de la práctica a partir de la cual podemos planificar nuestros movimientos (Miall & Wolpert, 1996). Llamaremos comando motor o comando eferente a la señal originada normalmente

resultado de esta planificación, la cual es generada por la corteza motora cerebral con la función de producir un movimiento (Latash, 2010).

Para el control de nuestras acciones será imprescindible la integración e interpretación de dos fuentes principales de información. La primera fuente es la de información sensorial aferente, la cual nos provee información tanto del entorno (exterocepción) como de nuestro propio cuerpo (propiocepción) (Schmidt & Lee, 2011). La segunda estará constituida por la información de las copias eferentes, señales consistentes en una copia de los comandos motores planificados (comando eferente) a partir de las cuales nos será posible predecir las consecuencias de la acción motora antes de la disponibilidad de las consecuencias sensoriales aferentes producidas por la ejecución del movimiento (Shadmehr, Smith, & Krakauer, 2010). De la comparación de ambas fuentes de información se iniciará y/o realizará el proceso de aprendizaje motor, el cual se basará en la incorporación y procesado de la información aferente y copia-eferente a un llamado sistema en bucle cerrado, el eje central del cual será el ya citado modelo interno (Ramnani, 2006) (ver Figura 1.1).

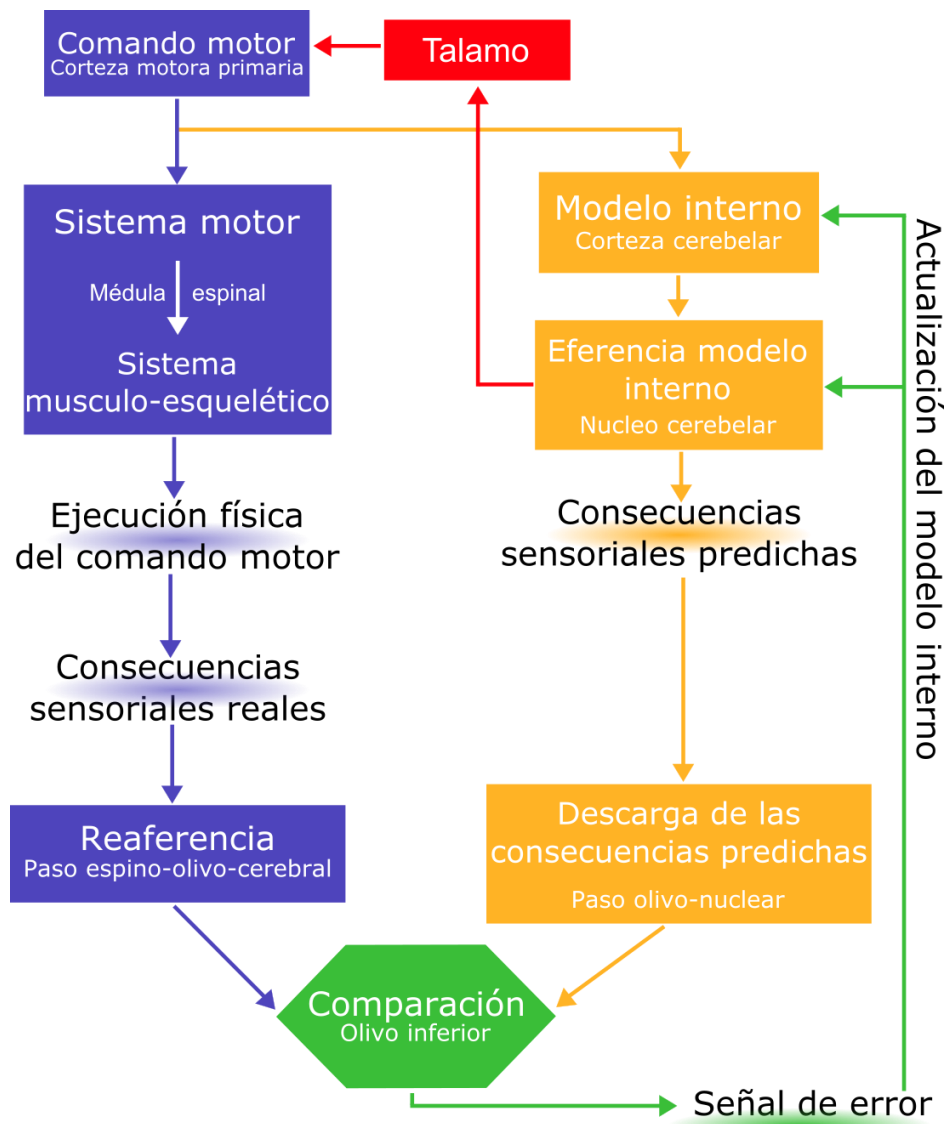


Figura 1.1. Sistema de bucle cerrado para el control y el aprendizaje motor. Durante la ejecución de una habilidad motora, a partir del modelo interno, se iniciará la planificación de los comandos motores a ejecutar (circuito rojo). Durante el aprendizaje, la señal generada en la producción de un comando motor es trasladada al sistema motor y al sistema musculo-esquelético, el cual ejecutará físicamente este comando motor (circuito azul). Paralelamente, se realizará una copia eferente de esta señal con tal de refinar el modelo interno preexistente y realizar una predicción aferente de las consecuencias de la acción (circuito amarillo). La copia eferente y las consecuencias aferentes del movimiento producido serán comparadas y, a partir de esta comparación, se construirá una señal de error (*feedback*) que actualizará, junto a la copia eferente realizada anteriormente, el modelo interno preexistente (circuito verde). Figura adaptada de Ramnani (2006).

Ante una nueva tarea motora, este modelo interno es generado y refinado a partir de la experiencia, proceso al cual se denomina **adaptación** motora (Krakauer, Ghez, & Ghilardi, 2005). Este proceso de adaptación es resultado de la comparación de la información sensorial aferente y copia-eferente, generando así señales de *feedback* desde las cuales se actualizará dicho modelo interno (Shadmehr et al., 2010). Una vez adquirido, este modelo interno de la habilidad se presenta inicialmente frágil a posibles interferencias del comportamiento y puede llegar a revertirse el proceso de adaptación, por ejemplo, a partir de la práctica de otra tarea motora (Krakauer et al., 2005). No será hasta haber pasado un intervalo de tiempo desde el inicio de la práctica de la habilidad cuando este modelo interno se vuelva más resistente a posibles interferencias (Krakauer & Shadmehr, 2006).

La estabilidad necesaria para solventar este proceso de interferencia en el aprendizaje motor es alcanzada con la llamada **consolidación** del modelo interno adquirido, el cual trasciende de un estado frágil a un estado más permanente gracias a los mecanismos de formación de la memoria a largo plazo (Krakauer & Shadmehr, 2006).

1.1.2 La evaluación del aprendizaje motor

Magill y Anderson (2014) definieron que durante la evaluación del aprendizaje motor debemos tener en consideración los conceptos de rendimiento (*performance*) y de aprendizaje (*learning*). Los mismos autores se refieren al rendimiento como el comportamiento motor observable mediante la evaluación, mientras que hablan de aprendizaje al referirse a un cambio relativamente permanente en el rendimiento como resultado de la práctica o la experiencia. Considerando los conceptos de adaptación y consolidación expuestos anteriormente, si bien ambos hacen referencia a

un cambio en el rendimiento de la habilidad motora, por definición, la consolidación del modelo interno sería un mejor indicador del aprendizaje que la adaptación por sí sola (Huang, Haith, Mazzoni, & Krakauer, 2011).

A la hora de evaluar el proceso de aprendizaje motor, Magill y Anderson (2014) proponen seis características que deberíamos analizar en la ejecución de la tarea motora: (a) mejora de los parámetros de rendimiento, (b) consistencia y reducción de la variabilidad entre intentos, (c) estabilidad ante posibles perturbaciones, (d) persistencia del comportamiento aprendido a lo largo del tiempo, (e) adaptabilidad o posibilidad de generalizar el aprendizaje a otras situaciones, y (f) reducción de la demanda de atención durante la ejecución de la tarea. A pesar de que todas estas características referentes al rendimiento tienen un papel importante en la evaluación del aprendizaje, destacamos la mejora del rendimiento (a) cómo indicador del proceso de adaptación y la persistencia del comportamiento aprendido (d) cómo indicador de que la habilidad ha sido consolidada. Para evaluar estos procesos de adaptación y consolidación a partir de estas características destacadas (a y d), los mismos autores proponen examinar los cambios del rendimiento a través del análisis de su evolución mediante la práctica y la evaluación de la persistencia mostrada en los test de retención.

Así, por un lado, el proceso de adaptación de la tarea será observado mediante el análisis de los cambios en el rendimiento, normalmente a partir de las curvas de rendimiento o, también llamadas, curvas de aprendizaje (Magill & Anderson, 2014). Este tipo de curvas pueden ajustarse a diversos tipos de funciones, aunque una de las formas de ajuste más habituales es la función exponencial. La curva de aprendizaje

exponencial se caracteriza por mostrar un proceso de adaptación donde existe un incremento muy grande del rendimiento en los primeros intentos de práctica en la tarea, seguido de una mejora lenta y que tiende a un techo del rendimiento o un punto en que la disminución del error será prácticamente nula (Krakauer et al., 2005). Entre las posibles formas de análisis de esta curva de aprendizaje, destacamos la posibilidad de registrar mediante la variable llamada ratio de aprendizaje (*Rate of Learning*) el valor de la pendiente de esta función, pudiéndose así representar la magnitud de la velocidad de adaptación a la tarea motora. Podemos encontrar dos ejemplos de este tipo de análisis en los estudios de Krakauer et al. (2005) y Joundi et al. (2012), donde se evaluó el proceso de adaptación mediante el análisis de los cambios en el rendimiento a través de la práctica. En ambos estudios se computó la ratio de aprendizaje durante la adaptación de una tarea motora a partir del ajuste de los valores de error a una función de tipo exponencial.

Por otro lado, el proceso de consolidación de la habilidad suele evaluarse por medio de los test de retención. Estos test de retención tienen por objetivo evaluar el grado de mejora o mantenimiento del rendimiento en la habilidad tras un intervalo de tiempo donde no se ha practicado la habilidad en cuestión (Roig et al., 2012), también llamado intervalo de retención (Magill & Anderson, 2014). Este intervalo de retención puede tener una duración arbitraria, aunque hay que asegurarse de que existe un lapso de tiempo suficiente como para garantizar que el rendimiento durante el test de retención es debido a los procesos de consolidación y no a una adaptación reciente en la tarea (Magill & Anderson, 2014). Algunos de los intervalos de retención habitualmente utilizados son de 1 hora, 24 horas o 7 días (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012; Thomas, Johnsen, et al., 2016).

En la presente tesis doctoral, los procesos de adaptación y consolidación motora serán evaluados a partir del análisis de los cambios en el rendimiento durante la práctica inicial en la habilidad y de varios test de retención, los cuales serán presentados en intervalos de retención de 1h, 24h y 7 días. En la Figura 1.2 se presenta un ejemplo de evaluación de los procesos de adaptación y retención de una tarea motora. En este ejemplo, se encuentra representada la dinámica de una variable de error denominada raíz del promedio de los errores al cuadrado (RMSE). Se puede observar la evaluación del proceso de adaptación a partir de la definición de la ratio de aprendizaje (RL), obtenida del ajuste de los datos a una función de tipo doble exponencial. En el caso de este ejemplo, el RL calculado corresponde solo al tramo inicial de la curva de aprendizaje, momento en que existe una reducción más rápida de los valores de error.

El proceso de consolidación de la habilidad fue evaluado tomando los valores de error mostrados en los test de retención, los cuales fueron realizados tras unos intervalos de retención de 1 h, 24 h o 7 días.

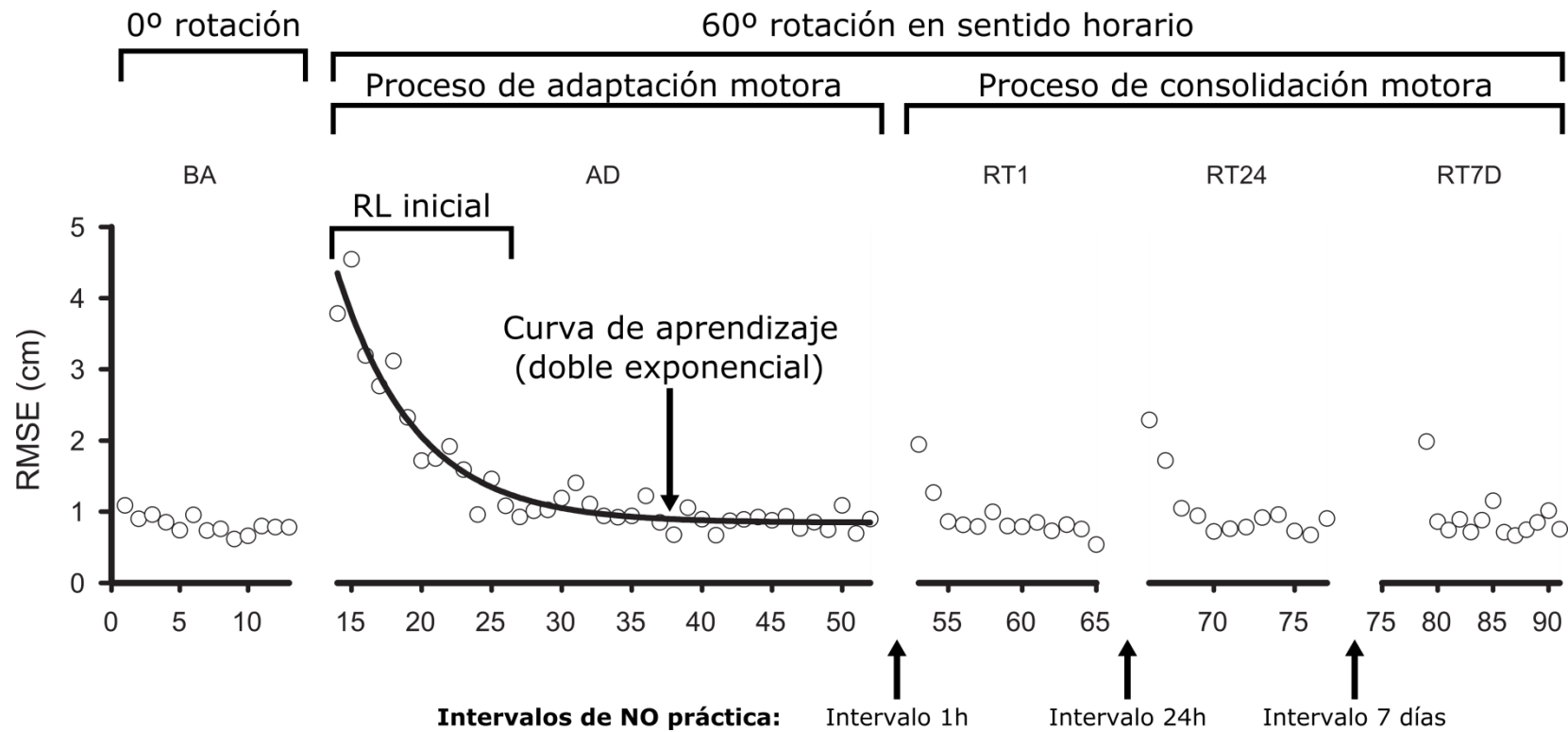


Figura 1.2. Evaluación de los procesos de adaptación y consolidación motora. Se presenta la dinámica de una variable de error (raíz del promedio de los errores al cuadrado, RMSE) a lo largo de una serie de bloques de práctica de una tarea motora. Valores menores de RMSE indican mejor rendimiento. El proceso de adaptación tuvo lugar durante el bloque de práctica AD. Para evaluar la adaptación, se computó la curva de aprendizaje y el valor de la ratio de aprendizaje (RL). El RL se computó utilizando el tramo inicial de la curva de aprendizaje, en el que existe un mayor decremento del error. Para la evaluación de la consolidación, se realizaron tres bloques de retención (RT1, RT24 y RT7D), con unos intervalos de retención de 1 h, 24 h y 7 días desde el final del bloque de AD. La tarea realizada en este análisis fue una tarea de adaptación visuomotora de tipo rotacional, en la cual los participantes debían adaptarse a una perturbación aplicada a sus movimientos a partir de una rotación. En el primer bloque de práctica, se evaluó el rendimiento basal de los participantes en ausencia de perturbación (BA). En los subsiguientes bloques de práctica (AD, RT1, RT24 y RT7D), los participantes tuvieron que adaptarse y consolidar un nuevo modelo interno para sobreponerse a la perturbación impuesta (60° de rotación en sentido horario).

1.1.3 Los paradigmas de aprendizaje motor

El estudio del proceso de aprendizaje motor detallado ha sido habitualmente llevado a cabo utilizando dos posibles paradigmas de aprendizaje: los paradigmas de aprendizaje de secuencias y los paradigmas de adaptación motora (Seidler & Meehan, 2013). En el caso del aprendizaje de secuencias se mide la adquisición de movimientos ejecutados siguiendo una cadena repetitiva, mientras que los paradigmas de adaptación motora se centran en la evaluación de nuestra capacidad para compensar los cambios acontecidos en el entorno o frente a las demandas de la tarea (Doyon, Penhune, & Ungerleider, 2003).

Una de las tareas más utilizadas dentro de los paradigmas de aprendizaje de secuencias es la Tarea del Tiempo de Reacción en Serie (*Serial Reaction Time Task*). En esta tarea, los participantes deben realizar movimientos lo más rápido posible (normalmente de los dedos de la mano), siguiendo una secuencia concreta que es para ellos normalmente desconocida y que se va repitiendo a lo largo de los intentos. Un ejemplo de este tipo de tareas sería el presentado por Doyon et al. (2003), donde los participantes debían pulsar lo más rápidamente posible uno de cuatro posibles botones en función de la localización donde aparecía una bola roja en una pantalla (Figura 1.3). Este estímulo era presentado en una secuencia de 10 ítems o localizaciones que se iba repitiendo de forma cíclica.

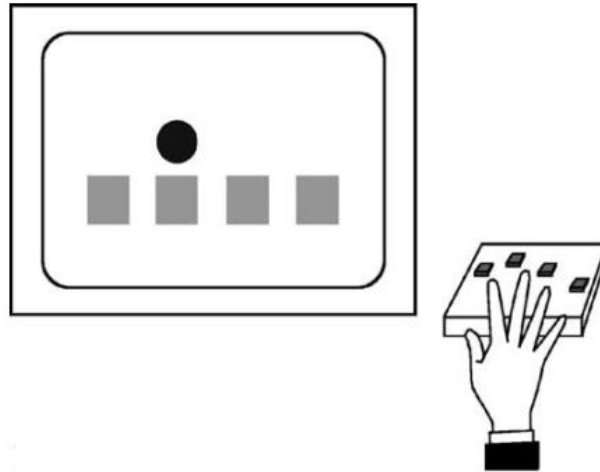


Figura 1.3. Representación esquemática de una tarea del tiempo de reacción en serie. En la tarea, los participantes debían pulsar el botón lo más rápido posible en función de la localización de la bola en la pantalla y repetir esta acción en una secuencia cíclica de 10 ítems o localizaciones. Figura adaptada, de Doyon et al. (2003).

En cuanto a los paradigmas de adaptación, unas de las tareas más utilizadas son las Tareas de Adaptación Visuomotora (VMA). En este tipo de tareas, habitualmente los participantes deben realizar movimientos de alcance (*reaching*) o lanzamientos con la mano, sobreponiéndose de forma paulatina a una perturbación aplicada a su percepción visual (p. ej. mediante la visión a través de un prisma o un espejo) o a su percepción quinesésica (p. ej. a través de la alteración de campos de fuerza generados al manipular un brazo robótico). Un ejemplo de este tipo de tareas es el presentado por Miall, Jenkinson, & Kulkarni (2004) donde, a partir del uso de un joystick, los participantes debían mover un cursor en la pantalla de un ordenador hasta llevarlo a un punto objetivo de 8 posibles (Figura 1.4). Los movimientos del cursor se encontraban desviados 30° en sentido anti-horario respecto a los movimientos del joystick, situación a la cual los participantes debían adaptarse. Parecida a la tarea planteada como ejemplo, en esta tesis doctoral hemos elegido una tarea de

Adaptación Visuomotora rotacional (rVMA), la cual se detalla más adelante, como el medio de estudio del aprendizaje motor.

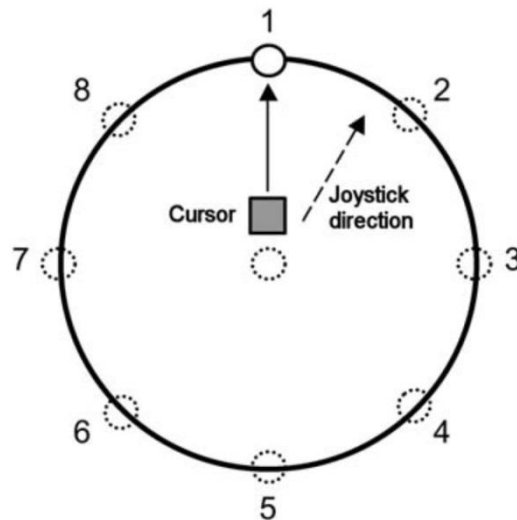


Figura 1.4. Representación esquemática de una tarea de Adaptación Visuomotora. En esta tarea, debían mover un cursor, controlado a través de un joystick, para alcanzar los puntos objetivo numerados del 1 al 8 que aparecían de forma aleatoria. Los movimientos del cursor eran rotados 30° en sentido anti-horario respecto los movimientos del joystick, situación a la cual tenían que adaptarse los participantes. Figura adaptada de Miall, Jenkinson, & Kulkarni (2004).

Las diferencias entre estos paradigmas de aprendizaje (secuencial o adaptación) no solo radican en su forma de ejecución, sino que se ha observado cómo estos paradigmas dependen también de diferentes vías neurales durante su aprendizaje (Krakauer & Mazzoni, 2011). Por ejemplo, mientras que para el proceso de consolidación de los paradigmas de adaptación el cerebelo parece constituir una de las principales regiones de almacenaje, los paradigmas de aprendizaje de secuencias parecen depender en mayor medida del cuerpo estriado (Doyon et al., 2003). Aun así, a pesar de intentar diferenciar estos dos paradigmas de aprendizaje motor, fuera del ámbito del laboratorio será difícil establecer dicha separación ya que en el aprendizaje de la gran mayoría de habilidades motoras deberemos adaptar nuestro

comportamiento a las perturbaciones inducidas por el entorno a la vez que seguimos una secuencia de acciones articulares y musculares definida.

1.2 Desarrollo motor y aprendizaje motor: diferencias entre niños y adultos

1.2.1 Relación entre el desarrollo motor y el aprendizaje motor

Independientemente del paradigma utilizado, parece ser que el proceso de aprendizaje motor descrito puede verse afectado de forma importante por el nivel de desarrollo motor de la persona que va a realizar dicho aprendizaje. Cuando hablamos de desarrollo motor nos referimos a un proceso de cambio sobre las habilidades motoras que se caracteriza por ser continuo y estar estrechamente relacionado con la edad, aunque no sea únicamente dependiente de ella (Haywood & Getchell, 2014). En general, a causa de un menor desarrollo motor, los niños muestran un nivel de rendimiento motor inferior y más variable que el de los adultos (Haywood & Getchell, 2014).

Estas diferencias en el rendimiento se han relacionado con el estado de desarrollo del sistema nervioso central de los individuos, encontrándose el momento de máximo rendimiento motor (velocidad de movimiento, tiempo de reacción, velocidad de procesamiento y precisión) durante la edad adulta joven (19-25 años) (Leveresen, Haga, & Sigmundsson, 2012). Además de estas diferencias en el rendimiento motor, también se ha observado cómo el nivel de desarrollo motor puede afectar a la dinámica del proceso de aprendizaje. Los niños presentan una ratio de adaptación inferior a la de los adultos y precisan de más tiempo o de un número mayor de intentos para la formación de un nuevo modelo interno (Vasudevan, Torres-Oviedo, Morton, Yang, &

Bastian, 2011). Así mismo, parece ser que, mientras que los adultos son capaces de manifestar la actualización de su modelo interno intento a intento, los niños precisan también de períodos de no práctica para poder manifestar esta actualización del modelo interno, especialmente en los niños más jóvenes (< 6 años) (Du, Valentini, Kim, Whitall, & Clark, 2017). De este modo, parece evidente que existen diferencias tanto en el resultado final del proceso de adaptación y aprendizaje como en el propio desarrollo del proceso. Por lo tanto, será importante tener en cuenta estas posibles diferencias relacionadas con el desarrollo y el rendimiento motor producidas por la edad, ya que pueden tener un efecto importante en el rendimiento y el aprendizaje de tareas motoras concretas.

1.2.2 Efecto del desarrollo motor en la tarea de Adaptación Visuomotora rotacional (rVMA)

Dentro del marco de la presente tesis doctoral y como ya hemos adelantado, se ha estudiado el aprendizaje motor en niños y adultos a partir de la utilización de un paradigma de aprendizaje de adaptación. La tarea concreta que se ha utilizado para este fin ha sido la tarea de Adaptación Visuomotora rotacional (rVMA). Por este motivo, más allá de las implicaciones que puede tener el desarrollo motor en el aprendizaje motor en general, creemos conveniente realizar una revisión del estado de la cuestión para el caso concreto de la tarea rVMA utilizada. De este modo, a continuación, detallaremos las características principales de la tarea rVMA y cómo puede el desarrollo motor afectar a su aprendizaje.

La tarea rVMA

En la tarea rVMA, el participante debe realizar movimientos de alcance con la mano (*reaching*) para mover un cursor que aparece en una pantalla de ordenador. Este cursor debe ser movido desde un punto base (posición inicial; punto azul en Figura 1.5) hasta una serie de puntos distales (objetivo; puntos rojo o rojo transparente en la Figura 1.5) distribuidos radialmente y de forma equidistante (Figura 1.5). Habitualmente, el movimiento del cursor se consigue a partir del trazo de la mano sobre una tableta digital o a través de un joystick. El brazo con el que el participante realiza el movimiento es ocultado, de modo que la única información visual que percibe el participante es el propio movimiento del cursor. La transformación o incongruencia característica de un paradigma de adaptación se consigue, en el caso de esta tarea, aplicando una rotación; es decir, desviando angularmente la trayectoria de movimiento del cursor. Algunas de las magnitudes de rotación más usadas son 45°, 60° y 90° (Buch, Young, & Contreras-Vidal, 2003; Contreras-Vidal, Bo, Boudreau, & Clark, 2005; Ferrel, Bard, & Fleury, 2001; Joundi et al., 2012). Como referencia, una rotación de 60° en sentido horario transformaría el movimiento diagonal ascendente y hacia la derecha de la mano del participante, en un desplazamiento diagonal descendente y hacia la derecha del cursor (Figura 1.5). A partir de la práctica y sin ser informado de la rotación, el participante “aprende” a corregir la trayectoria del cursor, propiciando así la formación de un nuevo modelo visuomotor interno (adaptación) el cual será consolidado pasado un período de no práctica de la habilidad.

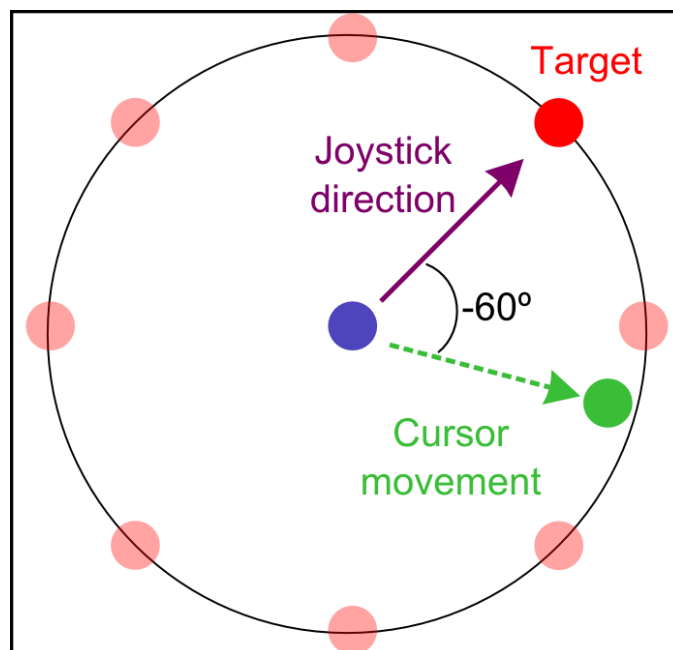


Figura 1.5. Representación esquemática de la tarea de Adaptación Visuomotora rotacional (rVMA). En la rVMA, los movimientos de la mano (*joystick direction*) de los participantes que sujetan un *joystick* producen el movimiento de un cursor en la pantalla de un ordenador (*cursor movement*). Durante la ejecución de la prueba, los participantes deben mover el cursor desde un punto central (azul) hasta un punto objetivo (rojo opaco) que puede encontrarse ubicado en diferentes localizaciones (rojo transparente). Durante la evaluación basal (rotación 0°), la dirección del movimiento de la mano (*joystick*) y del cursor son coincidentes. Por el contrario, durante la adaptación y retención de la tarea, los movimientos de la mano (*joystick*) de los participantes causan una incongruencia visuomotora ya que originan una rotación angular (en el caso de la imagen 60° en sentido horario) en el movimiento del cursor.

El desarrollo motor y su influencia en la adaptación de la tarea rVMA

Se ha observado cómo, con suficiente práctica, tanto la población adulta (Krakauer et al., 2005; Trempe & Proteau, 2010) como la infantil (Contreras-Vidal et al., 2005; Ferrel et al., 2001; Tahej, Ferrel-Chapus, Olivier, Ginhac, & Rolland, 2012) son capaces de adaptarse en la tarea rVMA y consolidar el nuevo modelo interno generado para esta tarea. Aun así, hay que considerar que para la existencia del proceso de consolidación, tanto para adultos como para niños, será necesario alcanzar un nivel de rendimiento elevado en la tarea durante su adaptación, reduciendo el error entre la trayectoria

ideal y la ejecutada por los participantes (Trempe & Proteau, 2010; Trempe, Sabourin, & Proteau, 2012).

Parece ser que ciertos factores relacionados con el desarrollo motor, y por lo tanto con la edad, podrían afectar al rendimiento en la tarea rVMA dificultando así su adaptación y consolidación. Los principales factores que podrían afectar al proceso de adaptación en la tarea rVMA son el nivel de rendimiento cognitivo y el rendimiento basal de la tarea en condiciones de no rotación (0° de rotación), factores que interactuarían con un tercer condicionante, la cantidad de rotación impuesta una vez aplicada la perturbación en la tarea (Ferrel et al., 2001; Tahej et al., 2012).

En niños, el modelo interno basal de la habilidad muestra un estado menos robusto y más variable que el de los adultos, especialmente en las edades más tempranas (5 años) (Contreras-Vidal et al., 2005; Ferrel et al., 2001). Así, los niños de edad temprana presentan mayores valores de error, más variabilidad y mayores dificultades para adaptarse a la rotación de la tarea, mientras que los adultos serían capaces de resolver la rotación de forma más eficaz, especialmente cuando los grados de rotación son elevados (>90°) (Ferrel et al., 2001). A pesar de esta situación, a partir de los 8 años de edad se ha observado cómo se produce un incremento en la velocidad, la precisión y una mejora en la planificación de la dirección del movimiento de los niños, hecho que tiene una repercusión positiva sobre la adaptación y consolidación de la habilidad (Contreras-Vidal et al., 2005). Además, que a partir de los 11 años de edad, los niños presentan unos resultados más similares a los de los adultos (Ferrel et al., 2001). De este modo, parece ser que la capacidad para resolver con éxito las rotaciones visuomotoras en un modo similar al de los adultos, podría desarrollarse entre los 8 y

los 11 años de edad. Aun así, incluso a los 11 años los niños presentarían un rendimiento absoluto inferior al de los adultos (Ferrel et al., 2001).

1.2.3 Estimulación del aprendizaje motor: plasticidad neuronal y entornos enriquecidos

Estas limitaciones de los niños respecto a los adultos, en relación al aprendizaje motor, deberían tenerse en cuenta al analizar, en un contexto más global, la importancia del aprendizaje motor durante la infancia. El aprendizaje de nuevos movimientos y habilidades motrices es uno de los aspectos esenciales de la vida. Desde el nacimiento, adquirimos o readquirimos habilidades motrices necesarias para nuestra actividad diaria y vital. Especialmente durante la infancia se realizará el aprendizaje y desarrollo de muchas de las habilidades motrices que nos acompañarán a lo largo de la vida (Haywood & Getchell, 2014). El desarrollo y aprendizaje motor durante la infancia tendrá un papel destacado, ya que será, en parte, responsable de la competencia motora durante la vida adulta (Lloyd, Saunders, Bremer, & Tremblay, 2014). De este modo, potenciar el aprendizaje motor durante la infancia podría ser de elevada importancia para aumentar las garantías de un desarrollo motor íntegro de la población.

Existe evidencia de que, durante el desarrollo de un organismo, su sistema nervioso central se encuentra en un estado más receptivo para producir cambios en las conexiones neuronales que ocurren como respuesta a un aprendizaje o una interacción con el entorno, predisposición conocida como plasticidad del desarrollo (*Developmental Plasticity*) (Rohlf's Domínguez, 2014). A pesar de que esta predisposición parece menguar a medida que el sistema nervioso se va desarrollando

acercándose a un estado similar al de los adultos, parece existir la posibilidad de emular un situación parecida a la plasticidad del desarrollo a partir del enriquecimiento del entorno donde se encuentra el individuo (Rohlf's Domínguez, 2014). Por su facilidad de aplicación y control, uno de los medios para garantizar un entorno enriquecido que más interés ha generado en las últimas décadas, y a través del cual se ha observado una mejora de la función cognitiva, es la práctica de ejercicio físico (Ploughman, 2008). Tanto en animales como en humanos adultos y niños, la práctica de ejercicio ha mostrado varios beneficios a nivel de la función cognitiva y la capacidad de aprendizaje de los individuos (Voss, Nagamatsu, Liu-Ambrose, & Kramer, 2011). De este modo, si el ejercicio puede mejorar la capacidad cognitiva se infiere el potencial efecto similar sobre la capacidad de aprendizaje motor, que puede estimular y facilitar los procesos de adaptación y consolidación motora tanto de adultos como de niños. Con el objetivo de ahondar en los efectos y, en parte, en los mecanismos a través de los cuales el ejercicio podría facilitar la función cognitiva y el aprendizaje, en los siguientes apartados realizaremos una revisión de la evidencia en relación al efecto del ejercicio sobre la función cognitiva y la capacidad de aprendizaje, tanto declarativo (memorización) como no declarativo (aprendizaje motor) (Squire & Kandel, 2000).

1.3 Efecto del ejercicio sobre la función cerebral y el aprendizaje declarativo

En los siguientes apartados se realizará la revisión de los efectos del ejercicio sobre la capacidad cognitiva y el aprendizaje, y se revisarán en primer lugar los causados por la práctica regular de ejercicio (ejercicio a largo plazo) y, en segundo lugar, los causados por la participación puntual en una única sesión de ejercicio (ejercicio agudo).

1.3.1 Efectos de la práctica de ejercicio a largo plazo

Efectos en animales

Los precursores de los estudios del efecto del ejercicio sobre la función cognitiva han sido los estudios realizados en animales. Estos estudios han permitido observar de forma directa (a partir de su disección y extracción de tejido cerebral) las alteraciones fisiológicas que suceden a nivel cerebral así, como los cambios en el comportamiento en relación a la función cognitiva a partir de la realización de un programa de ejercicio. A través de estos estudios se ha comprobado cómo un entorno enriquecido a partir del acceso a medios para la práctica de ejercicio, conlleva una mejora en la función de regiones concretas del cerebro como, por ejemplo, el hipocampo (Vaynman et al., 2004).

Se ha observado cómo estas mejoras en las estructuras cerebrales podrían deberse principalmente a tres factores: (1) el aumento de la secreción de sustancias neurotróficas que propician la neurogénesis o incremento del número de neuronas (Neeper, Gómez-Pinilla, Choi, & Cotman, 1996; Vaynman et al., 2004), (2) la angiogénesis o aumento de la vascularización (van Praag, Shubert, Zhao, & Gage, 2005a), y (3) el aumento de la plasticidad sináptica (sinaptogénesis) o capacidad del organismo para crear nuevas conexiones entre neuronas (Ding, Vaynman, Akhavan, Ying, & Gomez-Pinilla, 2006; van Praag, Christie, Sejnowski, & Gage, 1999a). De este modo, a partir de estos factores, el ejercicio podría poseer la capacidad de incrementar la función cognitiva, la capacidad de aprendizaje y la memoria espacial en animales (Ding et al., 2006; van Praag et al., 1999a; Vaynman et al., 2004).

Efectos en humanos adultos

En estudios realizados con humanos adultos, el ejercicio físico se ha mostrado como una herramienta potencial para impulsar la función de distintas áreas de la cognición humana en poblaciones de diferente edad (Griffin et al., 2011; Smith et al., 2010; Vaynman & Gomez-Pinilla, 2006; Voss et al., 2011). Una mayor cantidad de práctica de ejercicio y mejor rendimiento cardiovascular han sido relacionados con el volumen de varias estructuras cerebrales, como el hipocampo (Chaddock, Erickson, Prakash, Kim, et al., 2010) y los ganglios basales (Chaddock, Erickson, Prakash, Vanpatter, et al., 2010), los cuales podrían estar posiblemente vinculados con una mejora de la memoria y la capacidad de aprendizaje (Erickson et al., 2011). Los beneficios de un programa de intervención de ejercicio podrían obtenerse cuando el entrenamiento tuviera una duración superior a las tres semanas y la intensidad del ejercicio fuera de moderada a alta (Griffin et al., 2011; McMorris & Hale, 2012; Roig, Nordbrandt, Geertsen, & Nielsen, 2013). Además, este tipo de intervenciones parecen beneficiar especialmente (1) la capacidad de atención y la velocidad de procesamiento de información, (2) la función ejecutiva y (3) la memoria (Smith et al., 2010).

Efectos en humanos de edad infantil y pre-adolescentes

A través de varios estudios con participantes en edad escolar, se ha observado cómo un mayor volumen de práctica de actividad física y, a su vez, un mejor estado de condición física se relacionan positivamente con un mayor rendimiento cognitivo y, al mismo tiempo, con un mejor rendimiento académico (Castelli, Hillman, Buck, & Erwin, 2007; Fedewa & Ahn, 2011; Kantomaa et al., 2013; Lopes, Santos, Pereira, & Lopes, 2013; Scudder et al., 2014; Sibley & Etnier, 2003; Tomporowski, McCullick, & Pesce, 2015; Trudeau & Shephard, 2008). Más allá de su asociación con el nivel de condición

física, el rendimiento cognitivo y académico han mostrado verse beneficiados por la participación de los niños en un programa de entrenamiento aeróbico. En una revisión reciente Tomporowski, Lambourne y Okumura (2011) explicaron cómo, a pesar del reducido número de ensayos clínicos aleatorizados existentes, las intervenciones mediante actividad física de carácter aeróbico y de intensidad moderada a alta contribuían positivamente a la mejora de la función cognitiva, especialmente de la función ejecutiva, y al rendimiento académico de los niños.

De este modo, parece ser que el entrenamiento aeróbico de intensidad moderada a alta tiene la capacidad de incidir positivamente sobre la capacidad cognitiva de los niños (Best, 2010; Tomporowski et al., 2011). Aun así, se precisa de un mayor número de ensayos clínicos aleatorizados que contribuyan a mejorar el conocimiento de la relación entre la intervención mediante ejercicio físico y el rendimiento cognitivo en niños.

1.3.2 Efectos de la práctica de ejercicio agudo

Efectos en adultos

Más allá de los beneficios de un programa de entrenamiento sobre el rendimiento cognitivo, también se ha demostrado cómo una sola sesión de ejercicio físico aeróbico puede incidir positivamente sobre la cognición humana (Griffin et al., 2011). Existe evidencia de que un ejercicio aeróbico agudo puede incidir positivamente y de forma selectiva sobre varios procesos cognitivos (Chang et al., 2012) e incluso mejorar los procesos de formación de la memoria (Coles & Tomporowski, 2008; Roig et al., 2013; Winter et al., 2007). Aun así, los beneficios obtenidos mediante este tipo de intervenciones parecen depender en gran medida de ciertos moderadores como: las

características del ejercicio (principalmente la intensidad y la duración de este), el nivel de condición física cardiovascular de la persona, la tarea cognitiva a desarrollar y el tiempo transcurrido entre la sesión de ejercicio y la prueba cognitiva (Chang et al., 2014, 2012). Especialmente las características del ejercicio podrían ser algunos de los moderadores más relevantes (Ferris, Williams, & Shen, 2007; Roig et al., 2013; Winter et al., 2007). Parece ser que un ejercicio de moderada o baja intensidad produciría los mayores beneficios en aspectos de la cognición como la atención, la función ejecutiva y la velocidad de procesamiento (Chang et al., 2012), mientras que la memoria también podría verse beneficiada de un ejercicio de intensidad superior (Roig et al., 2013; Winter et al., 2007). De este modo, ejercicios de intensidades demasiado bajas no producirían ningún beneficio a nivel cognitivo a razón de resultar un estímulo insuficiente (McMorris & Hale, 2012).

En relación a la duración de la sesión de ejercicio, si bien no hay suficiente evidencia sobre cuál es la duración óptima en relación a la intensidad para obtener los mayores beneficios en la función cognitiva, sí que se ha observado que ejercicios excesivamente largos puede generar un exceso de fatiga y deshidratación, interfiriendo negativamente en el rendimiento cognitivo (Grego et al., 2005).

Efectos en humanos de edad infantil y pre-adolescentes

Del mismo modo que en personas adultas, en el caso de la población infantil se ha visto cómo un ejercicio aeróbico agudo puede inducir mejoras en la capacidad cognitiva (St-Louis-Deschênes & Elleberg, 2011; Tomporowski et al., 2011; Tomporowski, McCullick, Pendleton, et al., 2015). El área cognitiva que parece mostrar un mayor efecto al ejercicio agudo es la función ejecutiva (Best, 2010; Chen, Yan, Yin,

Pan, & Chang, 2014). A demás de la función ejecutiva, también se han observado resultados positivos en la estimulación de la memoria a largo plazo a partir de la práctica de ejercicio (Pesce, Crova, Cereatti, Casella, & Bellucci, 2009). De este modo, parece ser que la práctica de una única sesión de ejercicio podría tener un efecto positivo sobre la capacidad cognitiva y el aprendizaje de los niños. Partiendo de este precedente, creemos que el ejercicio físico también podría actuar como un medio para facilitar los procesos de adaptación y consolidación de los aprendizajes motores.

1.4 Efectos del ejercicio agudo sobre el aprendizaje motor de adultos y niños

1.4.1 Efectos en adultos

A pesar de que el volumen de evidencia en comparación con la existente en el estudio de la capacidad cognitiva y el aprendizaje declarativo es mucho menor, en los últimos años ha surgido un creciente interés por conocer cómo puede afectar el ejercicio físico a la capacidad de aprendizaje motor (Taubert et al., 2015). La primera evidencia que relaciona positivamente el ejercicio físico y el aprendizaje motor fue la presentada por Roig et al. (2012). Estos investigadores observaron cómo la práctica de ejercicio de intensidad elevada, ya fuese aplicado antes o después de la práctica en una tarea motora de adaptación, tenía un efecto positivo sobre la consolidación del aprendizaje a razón de una mejor retención al cabo de 24 horas y 7 días. Además, en el mismo estudio también observaron cómo, a pesar de obtener beneficios parecidos, los participantes que realizaron el ejercicio después de practicar la tarea motora, mostraron un mayor rendimiento en la retención a los 7 días que los participantes que realizaron el ejercicio en primer lugar. De este modo, no solo pusieron en evidencia los

efectos positivos del ejercicio, sino que también propusieron un posible efecto del orden de presentación entre el ejercicio y la práctica inicial en la tarea motora. A pesar de los beneficios encontrados en relación a la consolidación, en este estudio no se observó un efecto del ejercicio sobre el proceso de adaptación motora y se propuso como posible causa del efecto nulo el posible estado de fatiga inducido por el ejercicio antes de empezar la práctica de la habilidad.

Posteriormente, otros estudios han ido sumando evidencia en relación a los beneficios del ejercicio sobre el aprendizaje motor. Si bien el ejercicio de elevada intensidad no mostró un efecto sobre el proceso de adaptación motora (Roig et al., 2012), en estudios posteriores se ha observado cómo a partir de intervenciones de ejercicio de intensidad moderada se consigue facilitar este proceso (Snow et al., 2016; Statton, Encarnacion, Celnik, & Bastian, 2015). Aun así, la intervención de intensidad moderada realizada en estos estudios no presentó un efecto positivo sobre la consolidación de la habilidad. De este modo, y tal y como se ha comprobado posteriormente, parece ser que la intensidad del ejercicio podría tener un papel importante en la facilitación de los procesos de adaptación y consolidación motora (Thomas, Johnsen, et al., 2016). Así, el ejercicio de intensidad moderada mostraría los mejores resultados en relación a la estimulación de los procesos de adaptación, mientras que los mejores beneficios sobre la consolidación motora serían observados a partir de una intervención de intensidad elevada (Roig et al., 2012; Snow et al., 2016; Statton et al., 2015; Thomas, Johnsen, et al., 2016). Además del efecto moderador de la intensidad del ejercicio, también se ha observado que la proximidad temporal entre el ejercicio y la práctica en la tarea motora es de elevada importancia ya que desaparecen los efectos del ejercicio cuando el tiempo entre una y otra es excesivo (Roig et al., 2016; Thomas, Beck, et al., 2016).

Además de los beneficios encontrados sobre el comportamiento, algunos estudios también han analizado las posibles causas o mecanismos de estos beneficios. Concretamente se ha observado que existe una correlación entre las mejoras en la consolidación inducida por el ejercicio y el incremento de la excitabilidad cortico-espinal (Ostadan et al., 2016). Así mismo, también se han observado cómo algunos biomarcadores (catecolaminas y neurotróficos como el BDNF) asociados a los procesos de formación de la memoria a largo plazo (Bekinschtein, Cammarota, Izquierdo, & Medina, 2008; Ziemann, Iliac, Pauli, Meintzschel, & Ruge, 2004) se encuentran relacionados con la mejora de la consolidación de la memoria motora inducida por el ejercicio (Mang et al., 2014; Skriver et al., 2014).

En resumen, parece ser que, a pesar de que el estudio de los efectos agudos del ejercicio sobre el aprendizaje motor de adultos es relativamente reciente, existe suficiente evidencia para poder afirmar que el ejercicio físico, especialmente de intensidad elevada, puede constituir una herramienta útil para poder facilitar la consolidación del aprendizaje motor.

No obstante, existen dos factores que también podrían tener un papel importante en la relación ejercicio-aprendizaje motor y de los cuales actualmente se desconoce su efecto en profundidad: la duración del ejercicio y las características de la propia tarea motora. En relación a la duración del ejercicio, si bien se ha observado a través de meta-análisis que los mejores resultados sobre la consolidación de la memoria podrían lograrse ante intervenciones con una duración de entre 20 y 40 minutos, muy pocos estudios han utilizado duraciones menores a 20 minutos, limitando así la interpretación de estos resultados (Roig et al., 2013). Así mismo, en relación al

aprendizaje motor, no se ha abordado en ningún estudio el efecto de la duración del ejercicio como objetivo principal del estudio. Creemos que el parámetro de la duración del ejercicio puede tener un papel muy relevante en las posibles aplicaciones prácticas de una intervención de ejercicio con tal de facilitar el aprendizaje. Normalmente, la disponibilidad de tiempo suele ser una de las principales restricciones para la práctica de ejercicio tanto en adultos como niños, en entornos como la escuela, donde este tipo de intervenciones podrían ser aplicadas con una importante repercusión en la población infantil. De este modo, ampliar el conocimiento de los efectos de la duración del ejercicio permitiría optimizar la duración de las intervenciones en función de las situaciones donde se quiera utilizar el ejercicio como enriquecedor del entorno y por tanto recurso estimulador del aprendizaje.

Por último, si bien en varias situaciones se ha observado el efecto positivo del ejercicio sobre el aprendizaje motor, las tareas motoras utilizadas hasta la fecha han sido relativamente simples (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012; Statton et al., 2015), implicando únicamente movimientos de los dedos o la mano y realizándose dichos movimientos únicamente en una sola dirección. Creemos que estudiar el efecto del ejercicio sobre tareas motoras más complejas (p. ej. implicación de varias articulaciones y con movimientos en dos direcciones) podría ayudar a generalizar los efectos del ejercicio sobre otras situaciones de aprendizaje motor.

1.4.2 Efectos en niños

En contraposición a la creciente evidencia en relación a los efectos del ejercicio sobre el aprendizaje motor adulto, existe una evidencia muy limitada en relación a este fenómeno en el caso de población infantil. Recientemente se ha publicado un estudio

donde se ha presentado, por primera vez, cómo a partir de la práctica de ejercicio intenso agudo se puede estimular el aprendizaje motor en los niños (Lundbye-Jensen et al., 2017). En esta publicación, se realizaron dos tipos de intervención de actividad física, una de ellas limitada a la estimulación fisiológica del organismo a partir de un ejercicio de carrera de tipo interválico y la otra también buscando, además de la estimulación fisiológica a partir del ejercicio, el establecimiento de interacciones sociales y una mayor ocupación cognitiva a partir de la práctica de un juego colectivo de carácter intermitente (*floorball*), ya que parece que estos últimos factores podrían tener un efecto positivo añadido sobre la capacidad de aprendizaje (Pesce, 2012). Los resultados de este estudio mostraron que, tanto a partir de un tipo de ejercicio como de otro, se conseguía estimular la consolidación de la tarea motora al cabo de siete días de forma similar. De este modo, el estudio concluía que, si bien el ejercicio parece facilitar la consolidación de los aprendizajes motores en niños, parece ser que esta facilitación vendría principalmente dada por la estimulación fisiológica generada a partir del ejercicio y no por otros factores como la interacción social o los requisitos cognitivos de la actividad.

Dada la importancia que tiene el aprendizaje motor durante la etapa de la infancia y los positivos resultados que ha mostrado la intervención mediante ejercicio en el aprendizaje motor de los adultos y también, recientemente, en niños, creemos que profundizar en esta nueva línea de investigación podría tener repercusiones sociales importantes. En caso de demostrarse un efecto positivo del ejercicio sobre la capacidad de aprendizaje motor de los niños a partir de otras tareas motoras y/o condiciones relativas a las características del ejercicio, se podrían generalizar estos beneficios del ejercicio y optimizar las recomendaciones prácticas de cara a su

aplicación en situaciones o entornos donde se podría incidir positivamente en el aprendizaje y desarrollo motor de los niños como, por ejemplo, la escuela o el aprendizaje deportivo. Esta tesis doctoral representa un esfuerzo para aportar evidencia en este campo.

Capítulo 2: Objetivos e hipótesis de investigación



2.1 Objetivo general

El objetivo general de esta tesis doctoral fue el de analizar los efectos de una intervención de ejercicio intenso (iE) sobre los procesos de adaptación y consolidación motora de adultos (estudio 1) y niños (estudio 2 y 3) en la tarea rVMA. A su vez, nos propusimos evaluar el efecto del orden de presentación del iE y la tarea rVMA (estudios 1 y 2) y el efecto de la duración del iE (estudio 3).

2.2 Hipótesis específicas

Se definieron las siguientes hipótesis para cada uno de los estudios de investigación realizados dentro del marco de la tesis doctoral:

2.2.1 Estudio 1

- En adultos, el iE mejoraría la ratio de aprendizaje cuando fuera presentado inmediatamente antes del proceso de adaptación de la tarea rVMA.
- En adultos, el iE mejoraría la retención de la tarea rVMA a corto (1 h), medio (24 h) y largo (7 días) plazo.
- En adultos, el iE realizado inmediatamente después de la tarea rVMA tendría un efecto mayor sobre la retención a largo plazo (7 días) que presentado antes de la tarea rVMA.

2.2.2 Estudio 2

- En niños, el iE mejoraría la ratio de aprendizaje cuando fuera presentado inmediatamente antes del proceso de adaptación de la tarea rVMA.
- En niños, el iE mejoraría la retención de la tarea rVMA a corto (1 h), medio (24 h) y largo (7 días) plazo.

- En niños, el iE realizado inmediatamente después de la tarea rVMA tendría un efecto mayor sobre la retención a largo plazo (7 días) que presentado antes de la tarea rVMA.

2.2.3 Estudio 3

- El iE no tendría un efecto positivo sobre la adaptación en la tarea rVMA.
- El iE largo (13 min) mejoraría la consolidación de la tarea rVMA.
- El iE corto (5 min) también mejoraría la consolidación de la tarea rVMA, a pesar de presentar un efecto menor que el iE largo.

2.2.4 Análisis comparativo de los estudios 1 y 2

- Los adultos presentarían un mayor rendimiento basal que los niños en la tarea rVMA.
- Los adultos presentarían un mayor rendimiento durante la adaptación de la tarea rVMA que los niños.
- El iE facilitaría la consolidación motora de los niños en mayor medida que en los adultos.
- La realización de iE antes de la adaptación de la tarea rVMA sería la estrategia del orden de presentación que mayores beneficios daría a los niños en comparación con los adultos.

Capítulo 3: Metodología



Esta tesis doctoral está compuesta por un total de tres estudios consecutivos. Utilizando un procedimiento similar, en los tres estudios se evaluó el efecto del iE sobre la adaptación y consolidación de la tarea rVMA. Añadido a los tres estudios, en el séptimo capítulo de la presente tesis doctoral, se ha desarrollado un análisis comparativo de los datos y resultados obtenidos en los estudios 1 y 2. A continuación, se presentará un resumen de los métodos utilizados para la realización de los tres estudios. Se recomienda al lector dirigirse a los estudios correspondientes para una lectura más detallada de la metodología y los procedimientos utilizados en cada uno de ellos.

3.1 Participantes

Un total de 112 personas (29 adultos y 83 niños) participaron en los estudios. Antes del inicio del estudio, los propios participantes (adultos) o sus tutores legales (niños) fueron informados de los procedimientos del estudio y dieron su consentimiento escrito de participación. Además, los niños también dieron el asentimiento escrito de su participación. En la Tabla 3.1 se resumen las principales características de los participantes de los tres estudios. El estudio 1 estaba compuesto por la muestra adulta. Los estudios 2 y 3 estaban compuestos por la muestra de niños. El estudio 3 fue realizado en dos localizaciones o *Sites* diferentes: (1) Barcelona (Cataluña, España) y (2) Los Ángeles (California, Estados Unidos de América).

Los participantes de cada estudio fueron divididos en tres grupos diferentes. En los estudios 1 y 2, con tal de evaluar el posible efecto del orden de presentación del iE y la tarea rVMA, se dividieron los participantes en: grupo EX-rVMA (iE antes de rVMA), grupo rVMA-EX (rVMA antes de iE) y grupo CON (no realización de iE). En el estudio 3,

se dividió a los participantes en: grupo LONG (iE largo antes de rVMA), grupo SHORT (iE corto antes de rVMA) y grupo CON (no realización de iE). Para este último estudio, los participantes del grupo LONG y CON procedían de las localizaciones 1 y 2 (Barcelona y Los Ángeles, respectivamente), mientras que el grupo SHORT procedía únicamente de la localización 2. En la localización 1, los participantes y datos utilizados para este tercer estudio fueron los registrados durante el estudio 2 de la tesis (grupos EX-rVMA y CON).

3.2 Aprobación ética de la investigación

Los estudios se realizaron de acuerdo con los estándares de la “World Medical Association” (Declaración de Helsinki) y fueron aprobados por el “Comitè d’Ètica del Consell Català de l’Esport” (Site 1) y el “Committee for the Protection of Human Subjects of the California State University, Northridge” (Site 2).

3.3 Ejercicio intenso (iE)

A lo largo de los estudios se utilizaron dos protocolos de ejercicio diferentes: iE largo (estudios 1, 2 y 3) y iE corto (estudio 3). Los iE consistían en un ejercicio de carrera interválico (intensidad variable) de ida y vuelta en un tramo de 20 m, similar al del test de carrera lanzada en 20 m (20mSRT), también conocido como Test Course-Navette.

Tabla 3.1. Características de los participantes

Estudio	Grupo	N	Sexo (masculino / femenino)	Edad (años)	Altura (cm)	Masa corporal (kg)	IMC (kg/m ²)	VO ² max estimado (ml/kg/min)
Estudio 1	EX_rVMA	10	7/3	20.9 ± 1.8	172.0 ± 12.8	64.7 ± 11.1	21.7 ± 1.4	56.9 ± 3.6
	rVMA_EX	10	7/3	20.5 ± 1.8	168.7 ± 9.1	63.8 ± 9.5	22.3 ± 1.8	55.2 ± 5.5
	CON	9	7/2	22.1 ± 1.7	168.8 ± 7.9	63.4 ± 5.6	22.3 ± 2.1	52.3 ± 8.1
Estudio 2	EX_rVMA	10	7/3	9.2 ± 1.1	135.7 ± 8.7	32.9 ± 7.3	17.7 ± 2.5	50.9 ± 4.2
	rVMA_EX	12	8/4	9.1 ± 0.8	133.3 ± 7.2	31.2 ± 7.8	17.3 ± 2.7	51.4 ± 3.3
	CON	11	6/5	8.8 ± 0.7	135.5 ± 6.4	32.8 ± 8	17.7 ± 2.6	51.2 ± 5.6
Estudio 3 *	LONG	17	8/9	9.28 ± 0.7	138.06 ± 7.2	32.61 ± 6.8	17.04 ± 3.0	46.16 ± 2.0
	SHORT	19	11/8	9.19 ± 0.9	135.97 ± 7.6	34.85 ± 8.5	18.65 ± 3.2	44.80 ± 2.9
	CON	14	9/5	9.10 ± 0.6	132.51 ± 5.1	29.78 ± 0.7	16.90 ± 3.5	45.36 ± 2.9

Nota: *Para el estudio 3, se muestran únicamente las características de los participantes de la localización 2 del estudio (Los Ángeles, CA, EEUU).

Abreviaciones: Índice de masa corporal, IMC; Grupo de ejercicio antes de la tarea motora, EX-rVMA; Grupo de ejercicio después de la tarea motora, rVMA-EX; Grupo que no realizó ejercicio, CON; Grupo que realizó el ejercicio largo (13 min), LONG; Grupo que realizó el ejercicio corto (5 min), SHORT.

Durante la ejecución de los iE se combinaron dos velocidades de carrera: una velocidad correspondiente al 85% del VO_2 max estimado de los participantes (velocidad rápida) y otra al 60% del VO_2 max estimado de los participantes (velocidad lenta). En ambos iE se combinaron varios bloques de velocidad rápida y lenta. El iE largo estuvo compuesto por tres bloques de 3 min a velocidad rápida, separados por dos bloques de 2 min a velocidad lenta (rápida + lenta + rápida + lenta + rápida). El iE corto estuvo compuesto por dos bloques de 2 min de velocidad rápida separados por un bloque de 1 min de velocidad lenta (rápida + lenta + rápida). Para animar y facilitar el seguimiento del ritmo de carrera a los participantes infantiles, un adulto realizó el iE junto a ellos. Con el objetivo de mejorar el ajuste a las velocidades de ejecución del iE, antes de iniciar su ejecución todos los participantes realizaron un calentamiento consistente en 2 min a velocidad lenta + 1 min a velocidad rápida. Se dio un descanso de 5 min entre la finalización del calentamiento y el inicio del iE, donde se permitió a los participantes realizar estiramientos libres. Durante la ejecución del iE, se registró la frecuencia cardíaca de los participantes, latido-a-latido, con un Polar RS800CX (*Polar Electro*) a una frecuencia de 1000 Hz.

3.4 Tarea de Adaptación Visuomotora rotacional (rVMA)

Para la realización de la tarea rVMA, los participantes fueron sentados en una silla enfrente de una pantalla de ordenador situada aproximadamente a un metro de distancia y a la altura de sus ojos. Los participantes colocaron su brazo derecho encima de una superficie lisa y con su mano derecha sujetaron un *joystick*, utilizando una presa en garra (ver Fig. 1 del Estudio 1). La altura y posición del *joystick* fue ajustada para que los participantes pudiesen mantener una flexión de codo de

aproximadamente 90° y una posición de hombro cómoda. Los movimientos del *joystick* controlaban un cursor representado por un punto verde en la pantalla. Mediante el uso del *joystick*, los participantes debían mover el cursor hacia un punto objetivo de color rojo que aparecía en ocho posibles localizaciones (45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 y 360°) y a una distancia radial de 13 cm desde el centro (Figura 1.5). Una vez alcanzado el punto objetivo, los participantes debían devolver el cursor al punto de inicio. Un nuevo punto objetivo aparecía en una localización aleatoria cada dos segundos y permanecía visible únicamente 750 ms. Las coordenadas cartesianas (X, Y) de los movimientos del *joystick* fueron registradas con la utilización de una tarjeta A/D NI-6008 (*National Instruments Corporation*) a una frecuencia de 120 Hz. Se pidió a los participantes que pasaran por encima del punto rojo, realizando un único movimiento lo más rápido y recto posible.

En total, se realizaron seis bloques o sets de práctica en la tarea rVMA. Los dos primeros sets se realizaron sin aplicar ninguna rotación a la tarea (0°). El primer set fue el de familiarización (20 intentos), el cual no se registró y tenía la función de explicar el funcionamiento básico de la prueba a los participantes. El segundo set fue el basal (BA, 104 intentos), en el cual se registró el rendimiento de los participantes en condiciones de congruencia de la información visual y propioceptiva (sin rotación). En los cuatro sets restantes, se aplicó una rotación de 60° en sentido horario. El primero fue el set adaptación (AD, 312 intentos), donde los participantes debían adaptarse a la rotación aplicada en la tarea motora. Los tres sets restantes fueron los sets de retención (RT1, RT24 y RT7d, 104 intentos cada uno), los cuales fueron realizados 1h, 24 horas o 7 días después de la finalización del set AD.

3.5 Procedimiento general

Todos los participantes asistieron a cuatro sesiones experimentales. En la primera sesión, se valoraron: la cantidad de práctica de actividad física semanal, la existencia de posibles contraindicaciones para la práctica de ejercicio intenso, se tomaron medidas antropométricas básicas (altura y masa corporal), se registró el nivel de inteligencia a partir del test de inteligencia no verbal (TONI) y se valoró su estado de condición física a partir de la realización del test de ida y vuelta en 20 m (20mSRT). La segunda sesión fue realizada al menos 48 h después de la primera sesión. En esta segunda sesión, los participantes realizaron el iE y los sets de familiarización, BA, AD y RT1 en la tarea rVMA. El iE fue realizado justo antes (Estudios 1 y 2: EX-rVMA; Estudio 3: LONG y SHORT) o justo después (Estudios 1 y 2: rVMA-EX) del set de AD de la tarea rVMA en función del grupo experimental en el que los participantes estaban ubicados (Figura 3.1). Los participantes de los grupos CON descansaron en lugar de realizar el iE. Durante los periodos de descanso, se permitió a los participantes leer y mantener una conversación, pero no se les permitió escuchar música o dormir. En las sesiones tercera (24h después del AD) y cuarta (7 días después del AD), los participantes realizaron únicamente un set de retención en cada una de ellas (RT24 y RT7d).

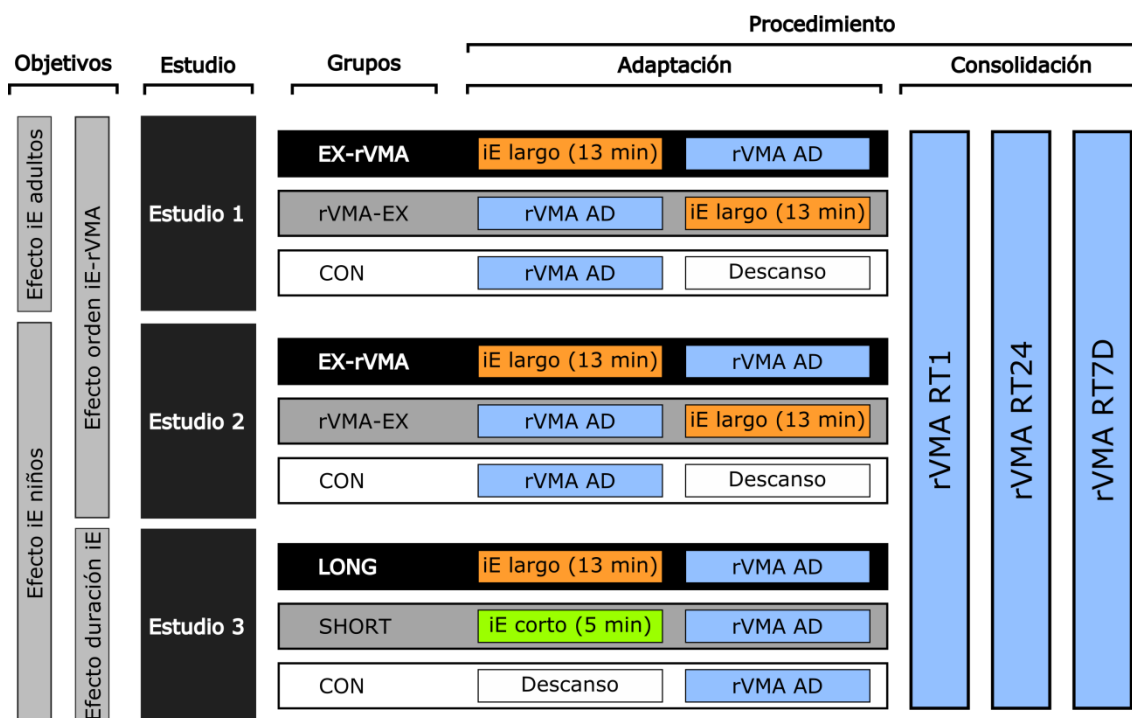


Figura 3.1. Resumen de los objetivos, estudios, grupos y procedimientos realizados dentro del marco de la tesis doctoral. Presentación de los estudios realizados para cada objetivo de la tesis y los grupos y procedimientos utilizados dentro de cada estudio definiendo los procesos de adaptación y consolidación motora. *Abreviaciones:* iE, ejercicio intenso; AD, adaptación; rVMA, adaptación visuomotora rotacional; EX-rVMA, grupo de ejercicio antes de la tarea rVMA; rVMA-EX, grupo de ejercicio después de la tarea rVMA; CON, grupo de no realización de ejercicio; LONG, grupo de iE largo; SHORT, grupo de iE corto; RT1, test de retención 1 h después de la AD; RT24, test de retención 24 h después de la AD; RT7D, test de retención 7 días después de la AD.

3.6 Variables

A partir de las coordenadas cartesianas del cursor controlado por el movimiento del *joystick*, se definió el inicio y final del movimiento de cada intento. El inicio del movimiento se definió como el instante en el que la posición del cursor estaba lo más cercana a un 10% de la distancia entre el origen del movimiento y el punto objetivo. El final del movimiento se definió como el momento en el que la velocidad de movimiento disminuyó un 90% respecto a su valor máximo. A partir de estos puntos de inicio y final, se calculó para cada intento de la tarea rVMA el tiempo tardado en realizar la trayectoria o tiempo de movimiento (MT, ms). Así mismo, se calcularon la

longitud de dicha trayectoria (TD, cm) y el tiempo de reacción, expresado como el tiempo entre la aparición del punto objetivo y el inicio del movimiento (RT, ms). También, para todos los sets, se calcularon dos parámetros de error: el error direccional inicial (IDE, grados) y la raíz del promedio de los errores al cuadrado (RMSE, cm) (Figura 3.2). El IDE fue calculado como medida del error antes de la posible corrección de la trayectoria a partir de los mecanismos del *feedback* y, por lo tanto, supuso una medida de la planificación motora (Contreras-Vidal et al., 2005). Para el cálculo del IDE, se computó la diferencia angular entre la trayectoria ideal del movimiento (vector lineal desde el punto central hasta el objetivo) y el vector lineal entre el punto central y las coordenadas del cursor correspondiente a los 80 ms desde el inicio del movimiento de la trayectoria real. El RMSE se utilizó como medida de error en el conjunto de la trayectoria, durante la cual podían existir correcciones realizadas a partir de los mecanismos de *feedback* perceptual. El RMSE fue calculado a través de la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2] \frac{1}{N}}$$

Donde (x_1, y_1) y (x_2, y_2) son las coordenadas de la trayectoria real y la trayectoria ideal, respectivamente, y N es el número de puntos en la trayectoria.

Durante el set de AD, se calculó la ratio de aprendizaje (RL) a partir del ajuste de los valores de error de todos los intentos del set de AD tanto para IDE como RMSE (RL-IDE y RL-RMSE). Para este cálculo, se agruparon los intentos de 8 en 8, en lo que definimos como *epoch* (Krakauer et al., 2005). Tal y como se ha observado en otros estudios

(Krakauer et al., 2005), el error durante la AD siguió una dinámica decreciente que mostró ajustarse a una función exponencial doble:

$$y = a * e^{b*x} - c * e^{d*x}$$

Donde y es la medida de error, x es el número del *epoch* y a , b , c y d son parámetros. La medida de RL utilizada fue la correspondiente a la ratio inicial, representada por un decrecimiento rápido del error. Para ello, se calculó la primera derivada de la primera mitad de la función doble exponencial y fue evaluada con un valor de *epoch* igual a 1, de forma similar a como ha sido descrito en otros estudios (Coats, Wilson, Snapp-Childs, Fath, & Bingham, 2014).

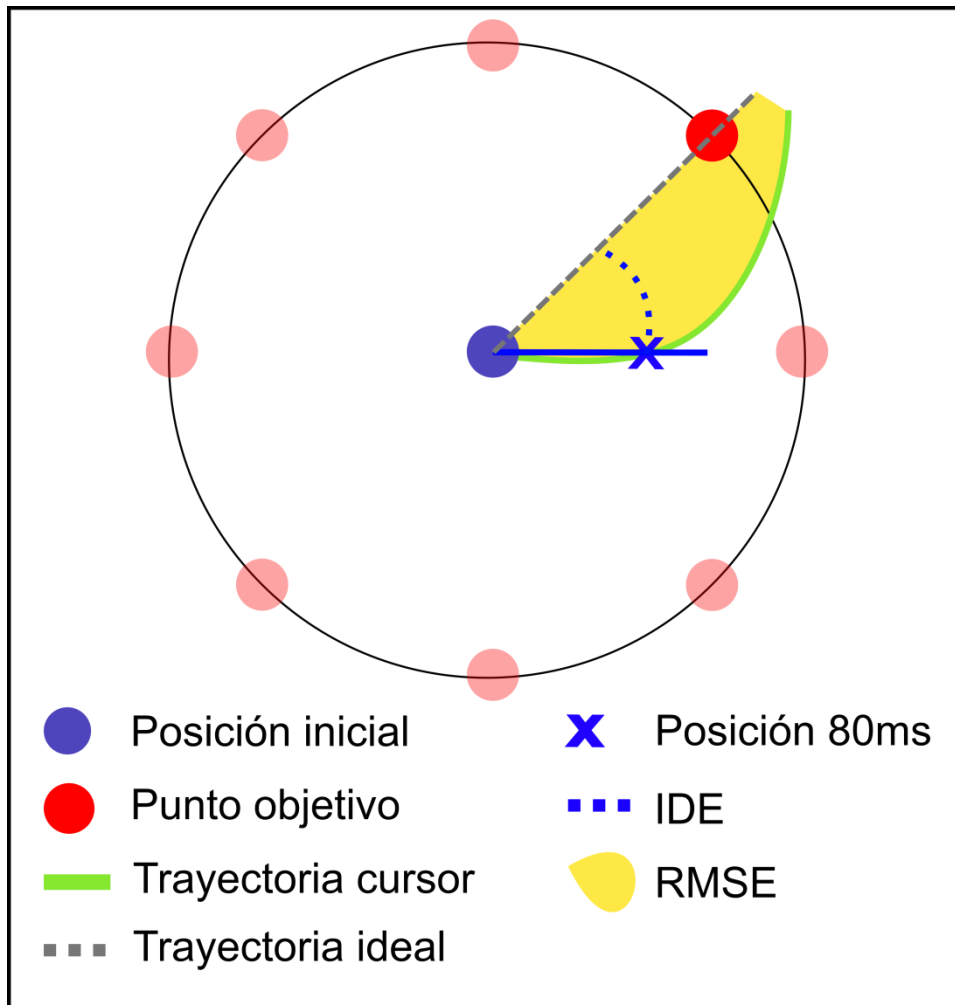


Figura 3.2. Representación esquemática de las variables de error computadas. La variable del error direccional inicial (IDE, línea azul punteada) fue representada por el valor del ángulo formado entre la trayectoria ideal y la trayectoria lineal del cursor a los 80 ms del inicio del movimiento. La trayectoria ideal fue definida por el vector lineal entre la posición inicial de la tarea (punto azul) y el punto objetivo (punto rojo). La trayectoria lineal del cursor a los 80 ms fue definida por el vector lineal (línea azul) entre la posición inicial y la posición correspondiente a 80 milisegundos desde el inicio del movimiento (x azul). El RMSE fue computado como la raíz del promedio de los errores al cuadrado a partir del vector ideal del movimiento y la trayectoria real del cursor (línea verde).

Capítulo 4: Estudio 1 - Enhancing consolidation of a rotational visuomotor adaptation task through acute exercise

Autores: Blai Ferrer-Uris, Albert Busquets, Virginia Lopez-Alonso, Miguel

Fernandez-del-Olmo, Rosa Angulo-Barroso



4.1 Abstract

We assessed the effect of a single bout of intense exercise on the adaptation and consolidation of a rotational visuomotor task, together with the effect of the order of exercise presentation relative to the learning task. Healthy adult participants ($n = 29$) were randomly allocated to one of three experimental groups: (1) exercise before task practice, (2) exercise after task practice, and (3) task practice only. After familiarization with the learning task, participants undertook a baseline practice set. Then, four 60° clockwise rotational sets were performed, comprising an adaptation set and three retention sets at 1 h, 24 h, and 7 days after the adaptation set. Depending on the experimental group, exercise was presented before or after the adaptation sets. We found that error reduction during adaptation was similar regardless of when exercise was presented. During retention, significant error reduction was found in the retention set at 1 h for both exercise groups, but this enhancement was not present during subsequent retention sets, with no differences present between exercise groups. We conclude that an acute bout of intense exercise could positively affect retention, although the order in which exercise is presented does not appear to influence its benefits during the early stages of consolidation.

4.2 Introduction

Humans learn and relearn numerous skills throughout their lives. Learning, along with brain function, is known to be influenced by many factors, including engagement in physical activity and a healthy lifestyle (Vaynman & Gomez-Pinilla, 2006). Physical activity, in particular, has been shown to have a positive impact on brain function and cognition (Hillman, Erickson, & Kramer, 2008), with supportive evidence coming from both animal and human studies (Ding et al., 2006; Griffin et al., 2011; Neeper et al., 1996; van Praag, Christie, Sejnowski, & Gage, 1999b; van Praag, Shubert, Zhao, & Gage, 2005b; Vaynman & Gomez-Pinilla, 2006; Vaynman et al., 2004; Voss et al., 2011). In a recent review, aerobic exercise training programs were shown to improve attention and processing speed, executive function, and memory (Smith et al., 2010). However, these benefits seem to depend on characteristics of the exercise, including its mode, intensity, and duration (Chang et al., 2012). More specifically, the benefits of exercise are aroused not only by training programs but also by acute bouts of exercise (Griffin et al., 2011). The evidence suggests that an acute bout of exercise can selectively improve various cognitive processes and enhance memory (Chang et al., 2012; Coles & Tomporowski, 2008; Roig et al., 2013; Winter et al., 2007).

Despite the growing knowledge base concerning how exercise influences cognitive function, research is scarce regarding how exercise affects specific types of memory. Long-term memory formation requires a two-step process: first, the acquisition (adaptation) of sensory information that will be stored as short-term (working) memory (lasting from seconds to 1-2 minutes) (Strauss, Spreen, & Sherman, 2006); and second, the consolidation of such memory so it becomes more stable and resistant to

perturbation (Bekinschtein et al., 2008; Robertson, Pascual-Leone, & Miall, 2004). Long-term memory can be split into declarative and non-declarative memory, with the latter being more relevant to learning motor skills (Squire, 2004). To our knowledge, the following articles have explored the effects of an acute exercise intervention on adaptation and retention of this concrete type of memory. Typically, motor memory consolidation is assessed via retention tests and therefore both terms are used interchangeably in the literature (Krakauer & Shadmehr, 2006).

Statton et al. (Statton et al., 2015) showed how a moderate-intensity running bout enhanced motor adaptation on the sequential visual isometric pinch task. However, adaptation enhancement did not lead to better retention of the motor skill. Roig et al. (Roig et al., 2012) studied how an intense acute bout of exercise (cycling) could improve motor adaptation and consolidation of a manual tracking task. Although it did not improve adaptation, exercise had a positive effect on mid-term (24 h) and long-term (7 days) skill retention. Moreover, they found that the presentation order of the exercise in relation to the learning task affected the outcome, with participants who exercised immediately after a learning task showing superior long-term skill retention compared with participants who exercised immediately before. Preceded by Roig's study, Mang et al. (Mang et al., 2014) observed that a single bout of intense cycling presented before a sequence-specific motor learning task (continuous tracking) enhanced adaptation and mid-term retention (24 h). Additionally, in a posterior study, the same authors observed that an equal exercise bout improved relearning of a discrete motor sequence task 24 h after adaptation (Mang, Snow, Wadden, Campbell, & Boyd, 2016). Overall, Mang's results suggest that intense exercise could strengthen the adaptation and retention of the motor skill.

The previously cited studies utilized tasks that required some form of motor adaptation while also including (Mang et al., 2014; Statton et al., 2015) or not (Roig et al., 2012) learning of an implicit sequence. Unfortunately, Roig's and Mang's studies used similar learning paradigms which limits their generalizability to other procedural learning situations. Moreover, when including the research of Statton et al. (2015), the motor tasks in these studies only required pinch, wrist, or thumb movements in a single direction (e.g. left-right). More complex motor learning paradigms, involving multi-joint and multi-plane movements, are needed to expand our understanding of how exercise can affect the learning process of other gross motor skills. Also, it is unclear how exercise characteristics moderate the exercise effects on adaptation and retention of motor skills. Consequently, a different exercise protocol and learning task is necessary to clarify the extent of exercise-induced benefits on cognitive processes and memory. Lastly, because of the limited evidence regarding the effect of the exercise presentation order in relation to the learning task (Roig et al., 2012), further research is needed to clarify what presentation order is best to enhance motor learning.

Here, we investigated the effect of running as an acute intense exercise (iE) on the adaptation and retention of a rotational visuomotor adaptation task (rVMA). In addition, we examined the effect of the presentation order of the iE in relation to the rVMA task on retention. We hypothesized that (1) iE would improve the learning rate when presented immediately before the adaptation process of the rVMA task; and (2) iE would improve the rVMA retention process in the short- (1 h), mid- (24 h) or long- (7 days) term. Additionally, we also aimed to explore the effect of the presentation order

of the iE and the rVMA task to observe if presentation order may lead to differences on long-term retention.

4.3 Materials and Methods

4.3.1 Participants

In total, 29 adults participated in this study, of whom 21 were males and 8 were females (7 male participants in each group); their mean age, height, and body mass was 21.2 ± 1.9 years, 169 ± 10 cm, and 64.0 ± 80.8 kg, respectively (see Table 4.1 for participants' background characteristics). Participants had no prior experience with the proposed learning task (i.e., the rVMA). The exclusion criteria for participation were selected in part to ensure compliance with the exercise protocol and the learning task: left-handedness; low engagement in physical activity; a body mass index above 30 kg/m²; below-average intelligence; a self-reported history of neurological, psychiatric, or physical impairment; uncorrected vision worse than 20/20; current medication or recreational drug use that may affect the nervous system or the ability to learn; and smoking. Participants were randomly assigned to one of three groups based on the relationship between the rVMA task and iE: (1) rVMA after exercise (EX-rVMA); (2) rVMA before the exercise (rVMA-EX); and (3) rVMA only (CON). Randomization was checked to ensure in age and fitness level among the three groups, as these factors have been reported to affect how acute exercise alters cognitive performance (Labelle, Bosquet, Mekary, & Bherer, 2013).

Tabla 4.1. Group characteristics

	EX_rVMA	rVMA_EX	CON
n	10	10	9
Sex (male/female)	7/3	7/3	7/2
Age (years)	20.9 ± 1.8	20.5 ± 1.8	22.1 ± 1.7
Height (cm)	172.0 ± 12.8	168.7 ± 9.1	168.8 ± 7.9
Body mass (kg)	64.7 ± 11.1	63.8 ± 9.5	63.4 ± 5.6
BMI (kg/m ²)	21.7 ± 1.4	22.3 ± 1.8	22.3 ± 2.1
TONI-2-IQ	121.4 ± 6.8	121.3 ± 6.4	125.6 ± 6.4
Estimated VO ₂ max (ml/kg/min)	56.9 ± 3.6	55.2 ± 5.5	52.3 ± 8.1
20mSRT HR (bpm)	186.1 ± 9.3	188.1 ± 10.4	186.2 ± 9.7
iE estimated 85% VO ₂ max HR (bpm)	182.9 ± 11.4	185.9 ± 12.6	-
iE_estimated 60% VO ₂ max HR (bpm)	161.2 ± 14.4	166.4 ± 13.8	-

Abbreviations: BMI = Body mass index; CON = no-exercise group; EX-rVMA = rVMA after exercise group; rVMA = rotational visuomotor adaptation task; rVMA-EX = rVMA before exercise group; TONI-2-IQ = Test of Nonverbal Intelligence version 2– Intellectual quotient; estimated VO₂max = estimated maximal oxygen uptake; 20mSRT = 20 meter Shuttle Run Test; HR = Heart Rate; iE = intense Exercise. HR during the 20mSRT was calculated as the mean±SD of the last completed minute. HR during the iE was calculated as mean±SD during the last 30 seconds of each estimated 85% or 60% VO₂max intensity interval.

The study was approved by the Clinical Research Ethical Committee of the Catalan Sport Administration. All participants provided written consent before the study commenced.

4.3.2 The rVMA task

The rVMA was conducted in a quiet room. Participants were seated in front of a 19-inch computer screen on which the task was presented. The screen was adjusted to eye level and sited at a distance of 1 meter. Participants' right arms were then rested over a height-adjustable flat surface to maintain 90° elbow flexion and a comfortable shoulder position. Participants were asked to grasp a non-isometric joystick with their right hand to control a green dot measuring 1 × 1 cm. They were instructed to use a claw-like grip, and to maintain this across all trials (see Figura 4.1 for a detailed overview of the rVMA setup). An NI USB-6008 card (National Instruments) registered

the x, y cartesian coordinates and their corresponding time-points of the joystick movements at a frequency of 120 Hz. Targets randomly appeared every 2 s as red dots (1×1 cm) in eight different locations (45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° , and 360° , in reference to the vertical midline) at a radius of 13 cm from the center. Each target remained visible for 750 ms. Participants were instructed to start from the center and were encouraged to move the green dot over the target (red dot) and back to the center as fast and as straight as possible in a single movement.

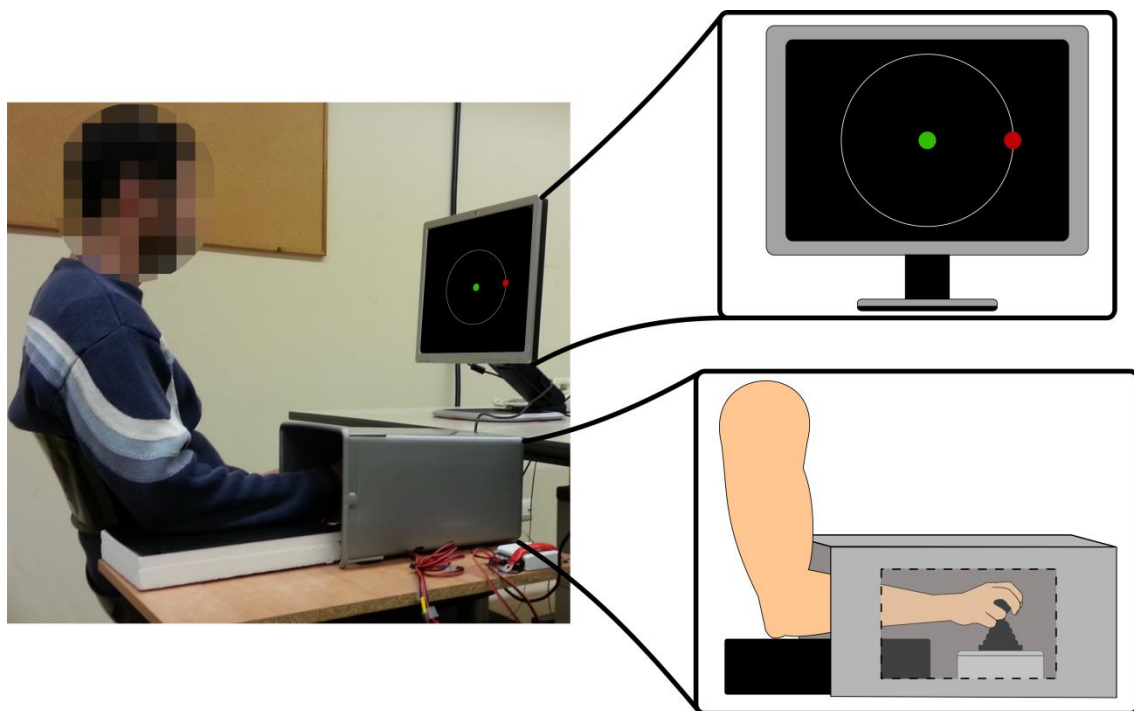


Figura 4.1. The rotational visuomotor adaptation task (rVMA). Illustration of the setup for the rotational visuomotor adaptation task (rVMA).

4.3.3 The iE bout

The acute bout of iE consisted of a 13- min 20-m shuttle run combining a fast and slow speed based on a percentage of the estimated $VO_2\text{max}$ (see *Procedure*): the fast speed

corresponded to 85% of the estimated $VO_2\text{max}$, and the slow speed corresponded to 60% of the estimated $VO_2\text{max}$. The iE proceeded as follows: 3 min fast + 2 min slow + 3 min fast + 2 min slow + 3 min fast. Exercise protocols of similar intensity have been previously used (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012) and high intensity interval exercise has recently found to enhance motor learning (Thomas, Johnsen, et al., 2016). Before starting the iE, a 3-min warm-up session was completed (a 2-min slow run and 1-min fast run) to familiarize participants with the iE speeds. A 5-min rest and free stretch period was also permitted before starting the iE. In the case of participants in the EX-rVMA and the rVMA-EX groups, the transition time between the iE and the rVMA was 4 min. We also recorded the participants' beat-by-beat values for the intervals between electrocardiogram R waves (RR intervals) during the exercise using a Polar RS800CX (Polar Electro) at a frequency of 1 KHz to monitor the exercise intensity. Calculated mean and SD for the heart rate (HR) values of the last 30 seconds of each speed interval are presented in Tabla 4.1.

4.3.4 Procedure

Four sessions were conducted for each participant (Figura 4.2).

In the first session, we reviewed whether the participant met any of the exclusion criteria and assessed their fitness level. Participants were asked to answer a self-report questionnaire related to the exclusion criteria, which included the Physical Activity Readiness Questionnaire (PAR-Q) to assess health status, and the International Physical Activity Questionnaire short version (IPAQ) to assess engagement in physical activity. Basic anthropometry measures (height and body mass) were taken. To assess fitness level (estimated $VO_2\text{max}$), participants did a 20-m shuttle run test (20mSRT)

(Léger, Mercier, Gadoury, & Lambert, 1988). During the 20mSRT, beat-by-beat RR values were recorded using a Polar RS800CX (Polar Electro) at a 1 KHz frequency. At the end of the first session, participants undertook the Test of Nonverbal Intelligence version 2 (TONI-2) to assess their intelligence level (TONI-2 Intelligence quotient, TONI-2-IQ). Between the first and the second session, participants were allowed to rest for at least 48 h.

In the second session, all participants performed the rVMA task, but only the experimental groups performed the exercise protocol. The session started with a familiarization set (20 trials) of non-registered practice in the rVMA task without rotation (0°). When the familiarization set ended, the baseline set was done without rotation (0° ; 104 trials). Next, participants did an adaptation set (312 trials) in the rVMA task, with a clockwise rotation of 60° applied to the cardinal coordinates of the cursor movement. Because of this rotation, movements of the hand and joystick appeared on the screen with a clockwise deviation of 60° . An example of the early and late trajectories of the cursor movement during the adaptation set is presented in Figure 4.3. At this point, the procedure was defined by the participant's group. The exercise groups did a 13-min iE session before (EX-rVMA group) or after (rVMA-EX group) the adaptation set. Mirroring the rVMA-EX group, the CON group did the adaptation set immediately after the baseline set, but without doing any exercise after completing the adaptation; only reading or holding a conversation was allowed. At 1 hour after the adaptation set, all participants did a 60° clockwise retention set (i.e., the RT1h; 104 trials). During this second session, participants were not allowed to listen to music, do any supplementary exercise, or to sleep.

Sessions three and four were held 24 hours and 7 days after the second session to assess mid- and long-term rVMA retentions, respectively. A 60° clockwise retention set (104 trials) was done in each session (RT24h and RT7d, respectively).

SESSION 1		
Questionnaire answering		
Anthropometry		
20 meter shuttle run test		
Test of non-verbal intelligence		
SESSION 2		
rVMA familiarization set (20 trials 0°)		
rVMA baseline set (104 trials 0°)		
EX-rVMA	rVMA-EX	CON
iE	rVMA adaptation set (312 trials 60°)	rVMA adaptation set (312 trials 60°)
rVMA adaptation set (312 trials 60°)	iE	
rVMA retention set after 1 h (104 trials 60°)		
SESSION 3 and 4		
rVMA retention set after 24 h (104 trials 60°)		
rVMA retention set after 7 days (104 trials 60°)		

Figure 4.2. Schematic overview of the experimental procedure. In session 2, after the rVMA task baseline sets, participants were divided into three groups based on the order of rVMA presentation and whether iE was used. Abbreviations: CON = no-exercise group; EX-rVMA = rVMA after exercise group; iE = intense exercise; IDE = initial directional error; RL = Rate of learning; RMSE = root mean squared error; rVMA = rotational visuomotor adaptation task; rVMA-EX = rVMA before exercise group

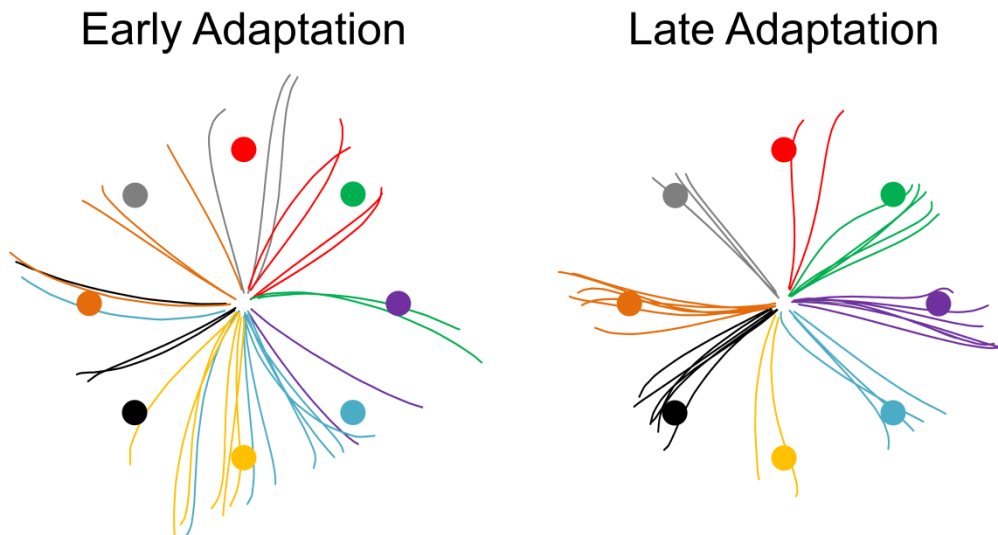


Figura 4.3. Early and late rVMA cursor trajectories during the adaptation set. The first and last 32 trials of a random participant are shown in the figure. A color has been assigned to each target and its corresponding trajectories to facilitate reading. Greater deviations from the target can be observed during the early adaptation in comparison to the late adaptation. During the test, all targets were presented as red dots.

4.3.5 Data reduction

Custom-made MATLAB R2014b programs (The MathWorks) were used to fit and reduce data. Cartesian positions were low-pass filtered using an eighth-order dual-pass Butterworth filter (cut-off frequency: 12 Hz). Only trials where the start was initially found within 20% of the center-to-target distance were accepted. Movement onset was defined as the nearest point to an outward movement equal to 10% of the center-to-target distance. The movement offset was defined as the point where the speed decreased to 10% of the maximum speed. In addition, we rejected trials in which the traveled distance did not reach 90% of the center-to-target distance. Overall, a total of 110 trials were rejected, which represents a 0.52% of the total executed trials. There were no group differences in the number of trials used for further analyses (Kruskal-

Wallis One-Way ANOVA, $p = 0.478$). Finally, all rVMA sets were divided into epochs of eight trials each for analysis purposes.

4.3.6 Variables

As descriptive variables of movement, we calculated the movement time (MT, ms), the travel distance (TD, cm), and the reaction time (RT, ms), which was defined as the time between target appearance and movement onset. The following movement output error variables were calculated, as presented in previous research (Contreras-Vidal et al., 2005): absolute angular initial directional error (IDE, degrees) and root mean squared error (RMSE, cm). IDE was calculated as the difference between the ideal trajectory, defined by the vector between the center point to the target, and the real trajectory, defined by the vector between the center point to the trajectory point at 80 ms after the movement onset. The 80 ms time point was selected to avoid possible corrections guided by visual feedback. RMSE, as straightness measure of the entire movement was calculated, considering the real joystick trajectory and the ideal trajectory (characterized by a straight line), as follows:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2] \frac{1}{N}}$$

where (x_1, y_1) and (x_2, y_2) are the coordinates of the real and ideal trajectory, respectively, and N is the number of points in the path.

As seen in other studies (Krakauer et al., 2005), we observed an initial rapid change in the error reduction rate followed by a slower decline during the adaptation set. We

found that these data were best fitted by a double-exponential decay function of the form:

$$y = a * e^{b*x} - c * e^{d*x}$$

where y is the error, x is the epoch number and a , b , c , and d are parameters.

To capture the initial rate of learning (RL), we computed the first derivative of the first half of the function and evaluated it at epoch 1, similarly to the method described by Coats et al. (Coats et al., 2014), for both IDE (RL-IDE) and RMSE (RL-RMSE). All individual correlations were visually inspected for a plateau suggesting that learning was achieved and all correlation values were above 0.8 (RL-IDE $r = 0.81 - 0.98$; RL-RMSE $r = 0.87 - 0.99$).

4.3.7 Data analysis

The assumption of normality was explored with the Shapiro–Wilk test for all variables. As appropriate, variables were transformed or subject to alternative non-parametric tests when the assumption of normality failed. Similarities in age and fitness level (estimated $VO_2\max$) among groups were explored by one-way analysis of variance (ANOVA). To ensure that the rVMA baseline performance was similar across the three groups, we compared the mean value for each variable (MT, TD, RT, IDE, and RMSE) using ANOVA. The statistical significance was set at $p < 0.05$ for all comparisons.

To address the first hypothesis, Student's t -tests were conducted to analyze the effect of the iE on the average performance of the motor skill adaptation (MT, TD, RT, IDE, and RMSE), comparing those participants who exercised before the rVMA task (i.e. EX-rVMA group [exercise cohort]) to those who did not (i.e. rVMA-EX + CON groups [no-

exercise cohort]). When unequal variances were found, Welch's *t* test correction was used. We also evaluated the differences between the exercise and the no-exercise cohorts in the rate of learning of the motor skill (i.e., the RL-IDE and RL-RMSE) by using the Mann–Whitney *U* test. In addition, to examine the relation between the degree of learning at 1 h and the adaptation set of both error variables (IDE and RMSE), we used the Pearson correlation coefficient between the end of the adaptation (average of last 4 epochs, 32 trials) and the start of the RT1h (average of first 4 epochs, 32 trials).

Regarding the second hypotheses and the aim to explore the effect of the presentation order of exercise and the learning task, averages were calculated for each variable (MT, TD, RT, IDE, and RMSE) and each rVMA retention set. Differences in the averaged retentions of the motor skill were analyzed by two-way (group × set) repeated-measures ANOVA, with Greenhouse–Geisser sphericity-corrected values reported when appropriate. Where a significant difference occurred, Bonferroni *post hoc* analyses were performed.

Finally, the effect sizes for the different tests were calculated according to Cohen's criteria (Cohen, 1988): *d* was used for *t*-tests (0.2, 0.5, and 0.8 for small, medium and large effects, respectively); *r* for the Mann–Whitney *U* test (0.1, 0.3, and 0.5 for small, medium and large effects, respectively); and η^2p for ANOVAs (0.01, 0.06, and 0.14 for small, medium, and large effects respectively).

4.4 Results

Age and fitness level (assessed by the estimated maximal oxygen uptake [VO₂max]) along with descriptive and error variables for the rVMA during the baseline set were explored to ensure that there were no baseline differences among groups. Age ($F_{(2, 26)} = 2.120$; $p = 0.140$; $\eta^2 p = 0.140$) and estimated VO₂max ($F_{(2, 26)} = 1.433$; $p = 0.257$; $\eta^2 p = 0.099$) parameters revealed no group differences (see Tabla 4.1 for means and standard deviation [SD]). Baseline set analysis showed similar rVMA descriptive values among the groups for MT ($F_{(2, 26)} = 0.098$; $p = 0.907$; $\eta^2 p = 0.007$), TD ($F_{(2, 26)} = 0.320$; $p = 0.729$; $\eta^2 p = 0.059$), and RT ($F_{(2, 26)} = 1.677$; $p = 0.207$; $\eta^2 p = 0.114$). In addition, there were no group differences for the error variables, neither for the IDE ($F_{(2, 26)} = 0.820$; $p = 0.451$; $\eta^2 p = 0.059$) nor for the RMSE ($F_{(2, 26)} = 0.253$; $p = 0.778$; $\eta^2 p = 0.019$) (see Tabla 4.2 for means and SD). These results suggested that the randomization procedure was effective in balancing the groups, and that the movement performances were comparable across the three groups in the baseline set of the rVMA task.

Tabla 4.2. Mean and SD performance values on the rotational visuomotor adaptation task (rVMA) for each group and set.

	EX-rVMA	rVMA-EX	CON
Baseline			
MT (ms)	144.49 ± 17.6	143.04 ± 36.0	149.19 ± 37.5
TD (cm)	7.42 ± 0.3	7.49 ± 0.4	7.56 ± 0.4
RT (ms)	346.50 ± 24.2	329.74 ± 17.8	340.37 ± 19.3
IDE (deg)	5.08 ± 1.0	5.79 ± 1.9	5.30 ± 0.5
RMSE (cm)	0.79 ± 0.0	0.81 ± 0.0	0.80 ± 0.1
Adaptation			
MT (ms)	154.63 ± 16.6	155.20 ± 37.8	172.01 ± 49.8
TD (cm)	7.43 ± 0.3	7.52 ± 0.4	7.53 ± 0.4
RT (ms)	343.64 ± 37.5	348.97 ± 18.9	350.25 ± 30.3
IDE (deg)	16.07 ± 3.0	14.89 ± 3.0	18.42 ± 3.1
RL-IDE	-11.66 ± 6.1	-12.40 ± 8.3	-11.02 ± 7.9
RMSE (cm)	1.55 ± 0.2	1.45 ± 0.2	1.68 ± 0.3
RL-RMSE	-0.99 ± 0.6	-0.99 ± 0.8	-5.47 ± 13.0
Retention 1h			
MT (ms)	148.02 ± 18.2	139.07 ± 25.9	161.71 ± 48.1
TD (cm)	7.37 ± 0.3	7.45 ± 0.4	7.53 ± 0.9
RT (ms)	350.99 ± 33.7	344.03 ± 24.1	346.66 ± 35.4
IDE (deg)	9.70 ± 1.4	9.43 ± 2.2	12.53 ± 2.3
RMSE (cm)	1.08 ± 0.1	1.08 ± 0.2	1.24 ± 0.3
Retention 24h			
MT (ms)	148.13 ± 16.3	136.41 ± 28.9	153.58 ± 43.5
TD (cm)	7.60 ± 0.3	7.92 ± 0.4	7.81 ± 0.6
RT (ms)	341.62 ± 29.5	336.62 ± 24.3	335.11 ± 28.3
IDE (deg)	11.66 ± 2.3	11.92 ± 2.2	12.39 ± 2.2
RMSE (cm)	1.27 ± 0.1	1.31 ± 0.2	1.31 ± 0.3
Retention 7 days			
MT (ms)	143.46 ± 23.1	138.96 ± 29.8	148.73 ± 41.3
TD (cm)	7.68 ± 0.4	7.85 ± 0.4	7.61 ± 0.4
RT (ms)	338.62 ± 29.2	334.70 ± 23.3	331.26 ± 26.4
IDE (deg)	10.83 ± 2.0	11.56 ± 2.6	11.12 ± 2.3
RMSE (cm)	1.20 ± 0.1	1.28 ± 0.2	1.20 ± 0.2

EX-rVMA = rVMA after exercise group; rVMA-EX = rVMA before exercise group; CON = no-exercise group; MT = movement time ; TD = travel distance ; RT = reaction time ; IDE = initial directional error ; RMSE = root mean squared error ; RL = rate of learning.

In the adaptation set we evaluated the impact of iE on the averaged descriptive and error variables, and on the initial error reduction on RL (Tabla 4.2). The *t*-tests showed similar results between those who exercised before the rVMA (exercise cohort) and those who did not (no-exercise cohort) for MT ($t_{(27)} = -0.579$; $p = 0.568$; $d = 0.199$), TD ($t_{(27)} = -0.695$; $p = 0.493$; $d = 0.283$), and RT ($t_{(27)} = -0.631$; $p = 0.533$; $d = 0.229$). Means and SDs for the no-exercise cohort were: 163.16 ± 43.49 ms for MT, 7.53 ± 0.39 cm for TD, and 349.57 ± 24.24 ms for RT (see EX-rVMA group values in Tabla 4.2). Comparison of the averaged errors also revealed similar performance between cohorts for the IDE ($t_{(27)} = -0.385$; $p = 0.703$; $d = 0.154$) and the RMSE ($t_{(27)} = -0.102$; $p = 0.919$; $d = 0.043$) with means in the no-exercise cohort of $16.56^\circ \pm 3.45^\circ$ and 1.56 ± 0.29 cm for IDE and RMSE respectively. Similarly, the Mann–Whitney *U* test showed comparable cohort results regarding the rate of learning for RL-IDE (exercise cohort median = -12.26° ; no-exercise cohort median = -10.83° ; $U = 88$; $p = 0.748$; $r = 0.05$) and RL-RMSE (exercise cohort median = -0.92 cm, no-exercise cohort median = -0.78 cm; $U = 82$; $p = 0.551$; $r = 0.11$) (Figura 4.4). These data mean that all participants adapted at a similar rate. Furthermore, taking together, all participants showed that performance at the end of the adaptation was significantly and positively correlated with the beginning of the RT1h (IDE $r = 0.46$, $p = 0.012$; RMSE $r = 0.578$, $p = 0.001$) (Figura 4.5). These results revealed that the exercise had no significant effects on the movement approach, the error values, or the error decrease rate during the adaptation set.

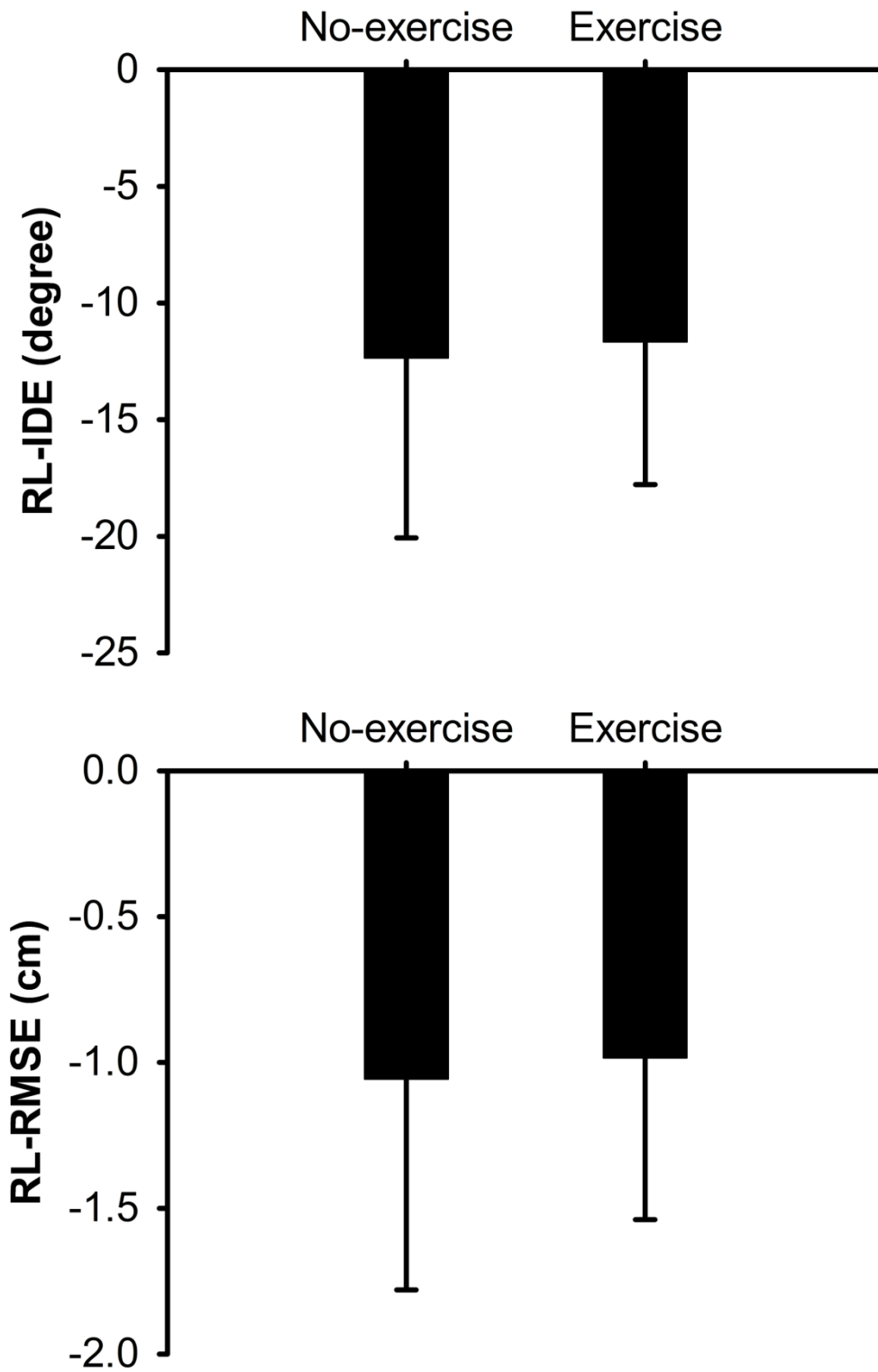


Figura 4.4. Comparison of the RL for the rVMA during the adaptation set between participants who did and did not perform exercise before the rVMA. RL was calculated for the error variables IDE and RMSE and expressed by mean and SD. Abbreviations: IDE = initial directional error; RL = Rate of learning; RMSE = root mean squared error; rVMA = rotational visuomotor adaptation task.

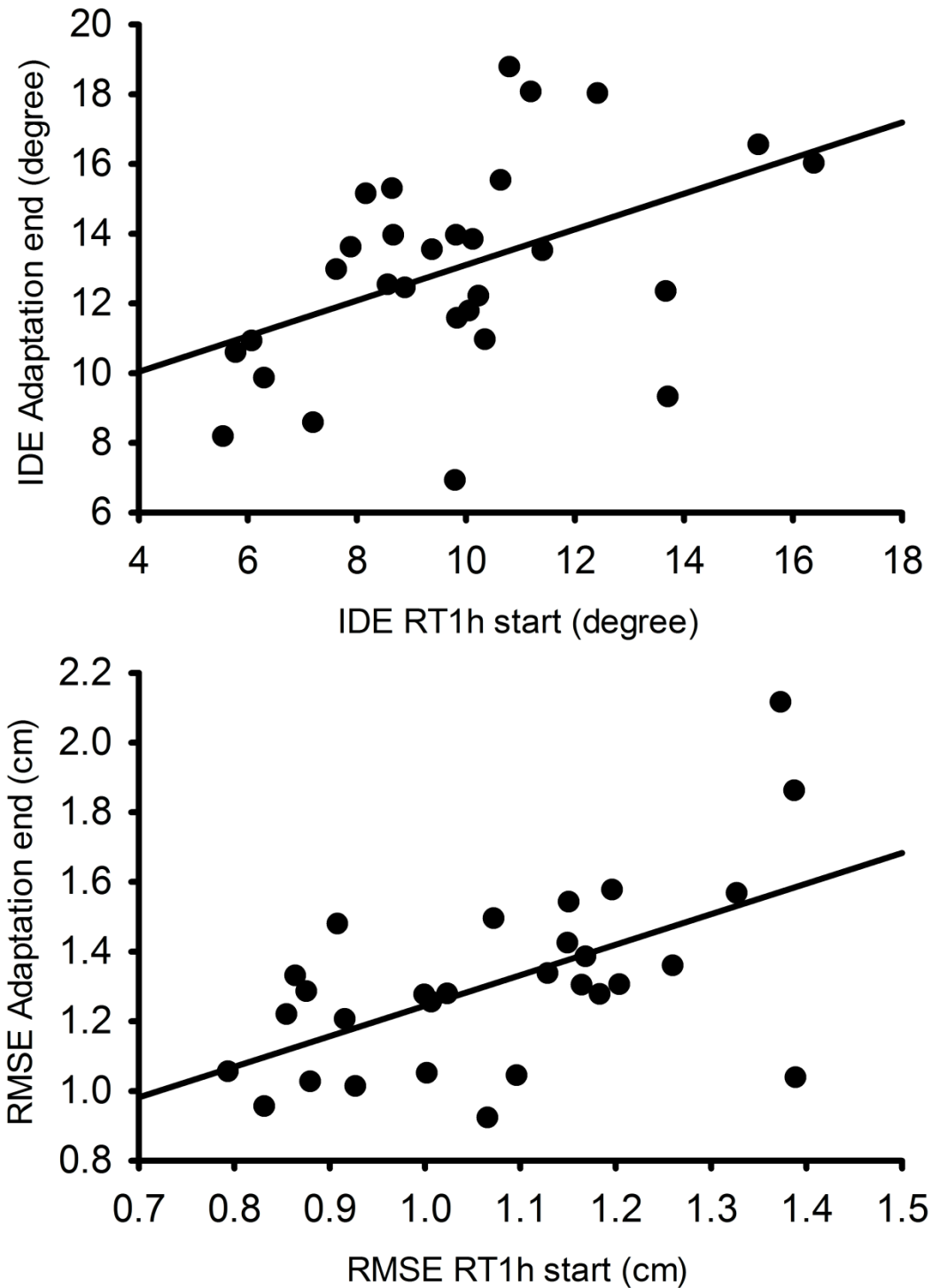


Figure 4.5. Correlation between error performance at the end of the adaptation and the start of the RT1h of the rVMA. IDE and RMSE mean errors were calculated at the end of the adaptation set (last 32 trials, 4 epochs) and at the start of the RT1h (first 32 trials, 4 epochs). Performance at the end of the adaptation and the start of RT1h were significantly correlated for both error variables: IDE and RMSE. Abbreviations: RT1h = retention set at 1h from adaptation set; IDE = initial directional error; RMSE = root mean squared error; rVMA = rotational visuomotor adaptation task.

Repeated-measures ANOVA was used to assess differences among groups during the retention sets (short-term = 1 h [RT1h]; mid-term = 24 h [RT24h]; and long-term = 7 d [RT7d]) of the rVMA task (Tabla 4.2 and Figura 4.6). There were no significant differences in the interaction between groups and sets regarding MT ($F_{(4, 52)} = 2.107$; $p = 0.093$; $\eta^2 p = 0.139$), TD ($F_{(4, 52)} = 1.161$; $p = 0.338$; $\eta^2 p = 0.082$), and RT ($F_{(4, 52)} = 0.192$; $p = 0.942$; $\eta^2 p = 0.015$). By contrast, significant group \times set interactions were found, with a large effect size, for both IDE ($F_{(4, 52)} = 30.946$; $p = 0.007$; $\eta^2 p = 0.233$) and RMSE ($F_{(4, 52)} = 3.685$; $p = 0.010$; $\eta^2 p = 0.221$). Post hoc analysis only depicted a significant difference for the IDE at RT1h, with both exercise groups (EX-rVMA: $p = 0.014$; rVMA-EX: $p = 0.007$) showing lower error values than the CON group, indicating a positive effect of exercise on the RT1h. No significant differences were found among the groups at RT24h and RT7d.

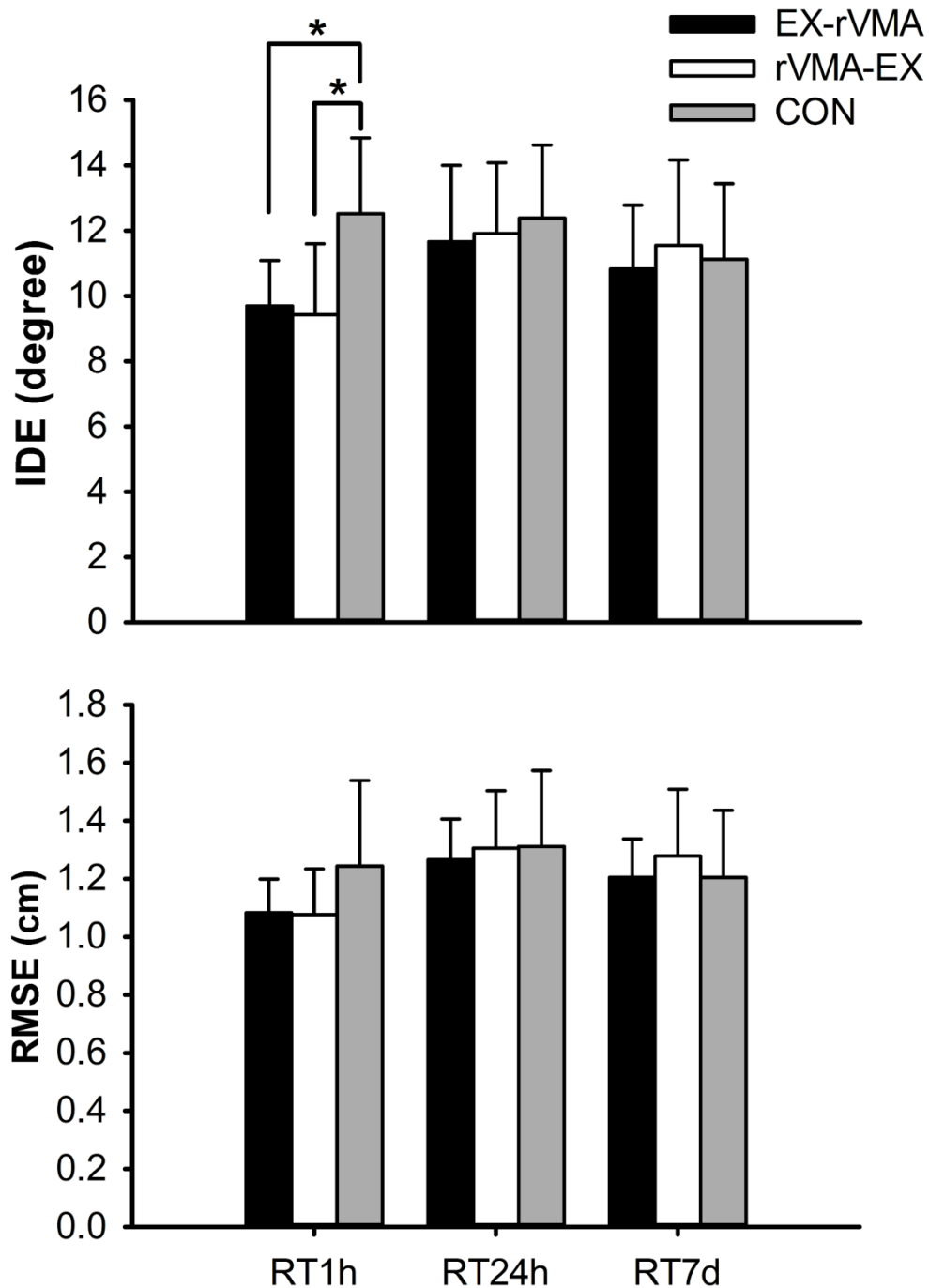


Figure 4.6. Error values among groups for the rVMA during the retention sets. Error values (mean and SD) are shown for the rVMA during the retention sets (short, RT1h, mid, RT24h, and long-term retention, RT7d). Significant differences between groups are represented by (*). Abbreviations: CON = no-exercise group; EX-rVMA = rVMA after exercise group; IDE = initial directional error; RL = Rate of learning; RMSE = root mean squared error; RT = reaction time (shown at 1 h = 24 h = and 7 days); rVMA = rotational visuomotor adaptation task; rVMA-EX = rVMA before exercise group.

4.5 Discussion

In this experiment, we sought to assess the effect of a single bout of iE on the adaptation to, and retention of, an rVMA task. We also investigated whether the order of task and exercise presentation produced different retention results. Regarding the adaptation set, there were no differences in the rVMA between those who did and did not exercise before the task, as evaluated by output movement error variables (RL-IDE and RL-RMSE), indicating that exercise did not contribute to improving the RL. Likewise, the overall movement error performance (IDE and RMSE) and descriptive (MT, TD and RT) parameters were not enhanced by the exercise bout. Thus, these results did not support our hypothesis that exercise would have a positive effect on motor adaptation when presented before motor tasks (Mang et al., 2014; Statton et al., 2015).

Timing between exercise and task presentation, the task characteristics (type of task and complexity), and the exercise characteristics (type of exercise, duration, and intensity) are some of the factors that have been seen to modulate this exercise-brain function relation (Chang et al., 2012; Lambourne & Tomporowski, 2010; McMorris & Hale, 2012; Roig et al., 2016). It is possible that the exercise intensity used in the present study may have hindered the possible beneficial effects of exercise for adaptation to the motor task after exercise. Similar results have been obtained by Roig et al. (Roig et al., 2012), who showed that a bout of high-intensity exercise before practicing a manual tracking task had no impact on adaptation. They proposed that exercise could induce fatigue, thereby hampering the possible benefits of exercise during adaptation by decreasing the accuracy. Considering the similarities between the

exercise used in this and in Roig's study (Roig et al., 2012), we speculate that fatigue, in addition to excessive arousal, may have caused the observed results in the adaptation set of the rVMA task. However, Mang et al. (Mang et al., 2014) found that, despite using a similar high-intensity exercise program to the one used by Roig et al. (Roig et al., 2012), participants who exercised before the motor task adaptation had enhanced performance. Despite this enhanced adaptation, exercise-induced benefits were only observed in the temporal components of the motor task. In the present study, exercise did not boost motor adaptation on any of the spatial or temporal task parameters, possibly because of the moderating effects of task characteristics over exercise-induced benefits (Chang et al., 2012). Thus, further research is necessary on the effects of high-intensity exercise on complex motor learning paradigms in task adaptation.

Regarding retention, IDE values were improved during short-term retention (RT1h) in both exercise groups. IDE is thought to reflect the planning of the movement direction, and thus the state of the internal model of the skill (Contreras-Vidal et al., 2005). Consequently, we suggest that the performed bout of iE positively affected short-term consolidation and retrieval of the newly formed internal model of the motor skill. Rotational visuomotor adaptation tasks, are known to be dependent on cerebellar function (Bernard & Seidler, 2013). It is known that acute intense exercise can impact the excitability of cerebellar circuits and that these cerebellar circuits may contribute to the exercise-induced increase in LTP-like plasticity in brain regions like premotor cortex (Mang, Brown, et al., 2016). However, more research is needed to improve our understanding of the mechanisms underlying the observed exercise-related boost on memory.

Although group differences were not confirmed, movement error expressed as the RMSE produced similar results to the IDE. It must be noted that RMSE includes initial movement planning and feedback-guided corrections during the path to the target. The fact that no differences were found among groups for the MT and TD at RT1h may indicate that quick and efficient correction of the trajectory occurred through the use of feedback in the control group. Despite participants in the exercise groups performing better at initial movement planning, feedback-guided corrections in the control group allowed them to correct the initial trajectory deviations to achieve comparable RMSE values to those of the exercise groups.

In contrast to the strengthening of the short-term retention (RT1h), exercise failed to maintain the observed benefits in the retention sets at 24 h (RT24h) and 7 days (RT7d) after adaptation. The IDE and RMSE values were similar for the three groups, indicating that exercise did not affect motor planning or feedback utilization at 24 h or 7 days after adaptation to the skill. Based on previous research (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012; Winter et al., 2007), we hypothesized that exercise would positively impact the RT24h and RT7d results. Roig et al. (Roig et al., 2012) found that a single bout of high-intensity exercise enhanced motor memory retention at 24 h and 7 days after adaptation. In a study by Mang et al. (Mang et al., 2014), a similar exercise intervention enhanced mid-term retention of motor memory (24 h). It seems that, compared to previous research, we demonstrated the more acute and transient effect of exercise. Three factors could explain why exercise may not induce persistent effects on memory formation: differences in the exercise bout characteristics (i.e., intensity and/or exercise mode), the fitness level of the participants, and the characteristics of

the learning task (Roig et al., 2016). We will now examine each of these factors separately.

High-intensity exercise may have the potential to facilitate memory consolidation (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012; Skriver et al., 2014). However, as seen in previous research, exercise bouts of insufficient intensity (low to moderate intensity) may not be sufficient to improve motor consolidation (Snow et al., 2016; Statton et al., 2015). When compared with studies that succeeded in finding 24 h and 7 day improvements in long-term memory, the exercise intensity in the present study (estimated 85% VO_2max) may have been too low; for example, Mang et al. (Mang et al., 2014) used 90% of power output, which was similar to that utilized by Roig et al. (Roig et al., 2012). In addition to intensity, there is evidence that the mode of exercise may influence its benefits. Recent reviews propose that cycling produces a greater effect on cognitive performance (Lambourne & Tomporowski, 2010) and long-term memory (Roig et al., 2013) than running. Accordingly, the running intervention used in the present study could have produced inferior results when compared to those from similar studies that used cycling (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012). This hypothesis is somewhat supported by the results of Statton et al. (Statton et al., 2015), who successfully enhanced motor adaptation through moderate-intensity aerobic running, but failed to induce more long-term benefits in motor retention. Hence the exercise bout used in this study may have been too intense to improve adaptation, but insufficiently intense to enhance the retention at 24 h and 7 days, with retention benefits limited to 1 h after adaptation.

The fitness level of the participants could also have affected the extent of the exercise-induced improvements. Exercise has been reported to exert greater effects on long-term memory when participants have only average fitness levels (Roig et al., 2013). Our sample seemed to have higher fitness levels which could explain differences between our results and those from previous studies. When comparing the fitness level of our exercise group (mean estimated VO_2 max: 56.06, range: 43.3–63.6 ml/kg/min) to that of Mang et al. (Mang et al., 2014) (mean VO_2 peak: 45.36, range: 30.4–63.4 ml/kg/min), it is plausible to consider that fitness level promoted mid-term retention in the study by Mang et al. (Mang et al., 2014), but promoted short-term retention in our study. However, when compared with the results presented by Roig et al. (Roig et al., 2012) (mean VO_2 peak: 53.35, range: 44.1–64.1 ml/kg/min), who achieved enhanced mid- and long-term retention, the fitness level was similar to that in the present study. Therefore, it remains unclear how fitness level could moderate the exercise-induced improvements on motor learning. The fitness level homogeneity of our sample limited the possibility to further explore the potential modulating effect of fitness level on the exercise-learning relationship. More research is necessary to increase our knowledge in terms of the effects of exercise on the mechanisms associated with learning improvement and the role of moderators (e.g., fitness level) in this relationship.

In addition to exercise characteristics and fitness level, task characteristics could also have affected the study results. It is known that the effect of exercise on cognitive function (Chang et al., 2012; Lambourne & Tomporowski, 2010) and long-term memory formation (Roig et al., 2013) can be modulated by the paradigm of the cognitive or learning task used. In the present study, improvements in short term

retention, 1 h from motor adaptation, were specifically observed for a rVMA task utilizing a 60° clockwise rotation. Previous research using motor procedural tasks have been successful in finding exercise-induced benefits on mid- and long-term memory at 24 h and 7 days after exposure (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012). However, to our knowledge, this is the first study describing the effect of an exercise intervention on the learning of a complex procedural motor skill that involved a multi-joint and multi-plane movement paradigm. The complexity of the rVMA task could have decreased the effect of exercise, limiting the anticipated mid- and long-term benefits. Moreover, the previous studies by Mang et al. (Mang et al., 2014) and Roig et al. (Roig et al., 2012) relied on tasks mainly focused on accuracy. By contrast, participants in our rVMA task were instructed to “move the cursor over the target as fast and as straight as possible”, which required not only accuracy but also speed of processing and execution. Research has differentiated the effects of exercise in speed and accuracy components of cognitive and simple motor tasks, with speed benefiting most from exercise (McMorris & Hale, 2012). Depending on the weight of the speed and accuracy components, and based on the results of previous research (McMorris & Hale, 2012), we propose that the speed–accuracy relationship could alter the effect of exercise on memory consolidation. Therefore, the speed requirements in the execution of the rVMA task may have affected participant’s long-term memory formation. In addition, despite involving some form of motor adaptation, the use of alternative learning paradigms (e.g. implicit sequence learning) in previous studies (Mang et al., 2014) could explain different results compared to the present research possibly because of the implication of different neural pathways (Krakauer & Mazzoni, 2011), among other factors.

Finally, contrary to what previous research has defined (Roig et al., 2012), we observed no differences in memory consolidation based on whether exercise was presented before or after the adaptation set. We presume that the initial consolidation stages may equally benefit from exercise regardless of whether it is presented before or after adaptation. However, the null effect of exercise on mid- and long-term retention hinders further speculation on how the order in which exercise is presented may modulate longer delayed effects. More research is needed to confirm whether the presentation order of the exercise relative to practice can trigger different mechanisms, as proposed by Roig et al. (Roig et al., 2012).

Despite finding an enhanced rVMA retention at 1 h as a consequence of the exercise intervention, our results may be affected by some limitations. It could be though that exercise effects on motor consolidation could be influenced by relearning because of the high amount of trials performed during the retention sets. However, IDE presented a similar trend of findings during the first trials of the RT1h set, compared to the overall set performance (see graph B in Figura 4.7). Furthermore it seems that in comparison to other studies (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012), the reduced exercise intensity and the mode of exercise (i.e., running) might have compromised the exercise-induced benefits on mid- and long-term retentions. Likewise, it is possible that the high fitness level of participants in the present study could have altered the mid- and long-term effects. Therefore, to confirm the mid- and long-term benefits seen in previous studies, there would be a need to use a higher exercise intensity (90% of $VO_2\text{max}$) and to include a population with regular fitness levels. Furthermore, the lack of neurochemical assessments limits our ability to comment on the mechanisms that may trigger the consolidation enhancement induced by exercise. In future

research, the collection of blood samples to examine changes in neurotransmitters and trophic factors concentrations may help clarify the mechanisms underlying the exercise-induced enhancement of memory consolidation.

4.6 Conclusions

In conclusion, a single bout of iE enhanced consolidation of an rVMA task, as expressed by improved retention at 1 h after task adaptation. Moreover, the order in which the exercise and the learned task were presented yielded similar benefits in retention at 1 h. However, we cannot reject the possibility of a long-term effect of exercise and task presentation order, because the exercise characteristics and fitness levels of the participants may have limited the benefits on mid and long-term retentions. Contrary to our expectation, exercising before a task practice did not improve the learning rate of the motor skill, probably because the exercise intensity was too high and there was a possibility of fatigue. Our results add evidence to the practical uses of exercise in learning and memory, but indicate that further research is needed to improve our understanding of how different exercise protocols affect procedural learning tasks. Moreover, to explore the effect of acute exercise on learning in different populations, future studies should aim to include participants with different fitness levels and ages.

4.7 Acknowledgements

This study was supported by Grup de Recerca en Activitat Física i Salut (GRAFIS, Generalitat de Catalunya 2014SGR/1629). We also want to thank Binith Cheeran for his help with the equipment set-up.

4.8 Supporting information

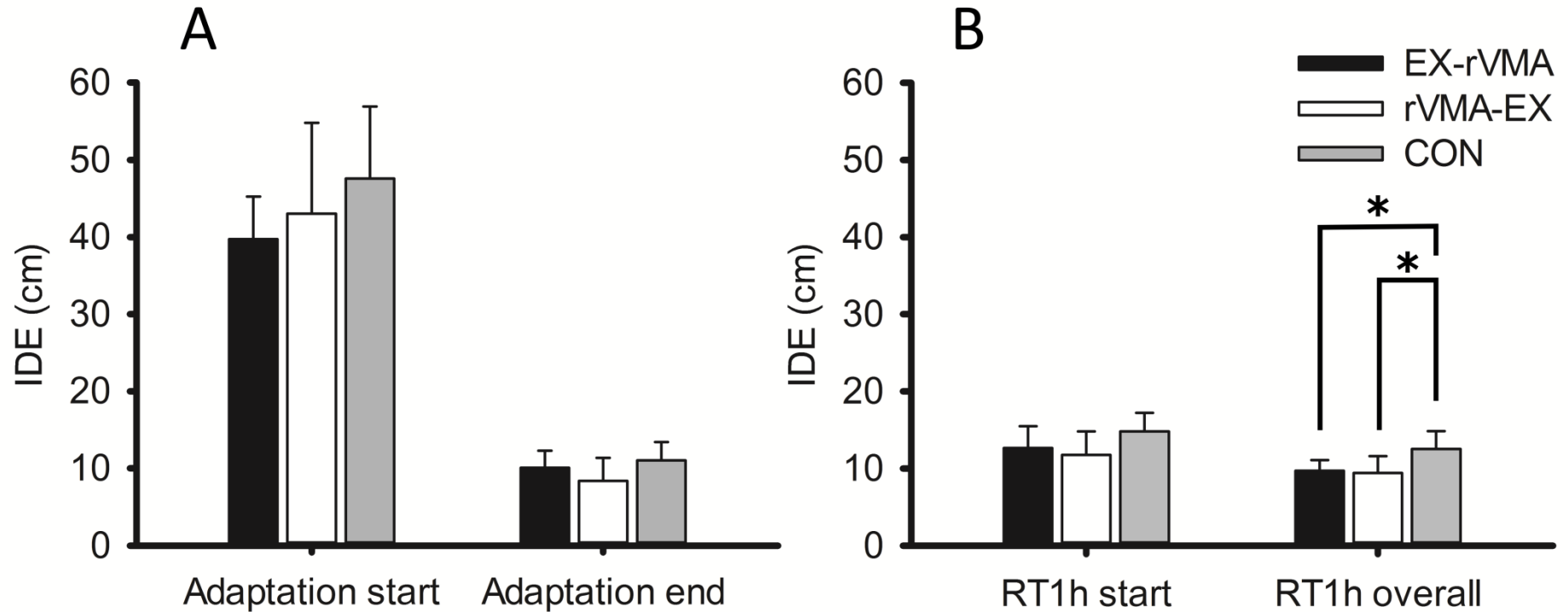


Figure 4.7. Exercise effects on motor adaptation and motor retention 1h. (A) IDE Performance is presented at the start and at the end of the adaptation (average of first and last 32 trials, respectively). IDE significantly decreased across all three groups as an effect of time, from start to end of the adaptation set. (B) IDE at the start (average of first 32 trials) and overall average IDE during the retention set at 1 hour (RT1h) are presented. Similar trends were observed between the RT1h start and the RT1h overall, which could indicate that exercise effects may begin from the start of RT1h. Additionally, performance level in all groups at the RT1h start was only slightly higher compared to their performance during adaptation end, meaning that some consolidation occurred during the 1 h rest period. Abbreviations: IDE = initial directional error; RT1h = Retention set at 1 hour; EX-rVMA = rVMA after exercise group; rVMA-EX = rVMA before exercise group; CON = no-exercise group.

Capítulo 5: Estudio 2 - Effects of a single bout of intense endurance exercise on the adaptation and retention of a perceptual-motor task in children

Autores: Blai Ferrer-Uris, Albert Busquets, Rosa Angulo-Barroso



5.1 Abstract

We aimed to assess the effect of an acute intense exercise bout on the adaptation and consolidation of a visuomotor adaptation task in children. We also sought to assess if exercise and learning task presentation order could affect task consolidation. Thirty-three children were randomly assigned to one of three groups: exercise before (1), exercise after (2) the learning task, and only learning task (3). Baseline performance was assessed by practicing the learning task in a 0° rotation condition. Afterwards, a 60° rotation adaptation set was applied followed by 3 rotated retention sets after 1h, 24h and 7 days. For exercise groups, exercise was presented before or after motor adaptation. Results showed no group differences during the motor adaptation while exercise enhanced motor consolidation. Greater consolidation enhancements were found in participants who exercised before the learning task. Our data indicates the importance of exercise to improve motor memory consolidation in children.

Keywords: motor learning; consolidation; motor planning; intense exercise; initial directional error; root mean square error

5.2 Introduction

Motor learning is especially important during childhood when many new skills that will endure through life are learned. Motor learning as a process may be divided into various stages, where we highlight the acquisition and effective use of sensorial information (adaptation) and the consolidation of this acquired information into the so called long-term memory (consolidation), becoming more stable and resistant to perturbations (Krakauer et al., 2005). Consolidation of motor memory is usually assessed by the ability to recall the learned skill at one or various time points after adaptation and following a period of non-practice (retention test). Finding ways to potentiate these adaptation and consolidation processes may positively affect motor learning in children. Physical exercise holds some promise in this regard.

Structural and functional brain changes and improvements in cognition have been observed in children presenting higher fitness level and higher physical exercise engagement (Chaddock, Erickson, Prakash, Kim, et al., 2010; Chaddock, Erickson, Prakash, Vanpatter, et al., 2010). These adaptations related to regular exercise practice are possibly associated with repeated bouts of acute exercise (Griffin et al., 2011; Hopkins, Davis, Vantieghem, Whalen, & Bucci, 2012). In adults, acute exercise seems to transiently affect brain function through an increase in the concentration of certain neurochemicals, such as neurotransmitters (e.g., catecholamines) and neurotrophic factors (e.g., brain derived neurotrophic factor, BDNF) (McMorris & Hale, 2012; Taubert et al., 2015). Regarding learning and memory consolidation, BDNF seems to be of particular interest because its relation to long term potentiation (LTP), which is one of the main processes of memory formation (Bekinschtein et al., 2008). Adult studies

have observed BDNF increases in response to an exercise bout which are correlated with adaptation (Winter et al., 2007) and memory consolidation (Skriver et al., 2014). Therefore, it seems possible that acute exercise would enhance learning through promotion of neuroplasticity-related processes (Taubert et al., 2015).

Improvements in children's cognition have been observed following an acute aerobic exercise bout (Sibley & Etnier, 2003). Most studies have focused on effects of moderate exercise intensity on executive function (Tompsonski, McCullick, Pendleton, et al., 2015), where improvements have been observed (Chen et al., 2014). Other cognition areas like memory, which is a key component of learning (Squire & Kandel, 2000), seems to also be facilitated following an acute moderate exercise intervention (Pesce et al., 2009). However, the relation between acute exercise and memory consolidation is still poorly understood in children. In adult population, long-term memory has been observed to improve when stimulated through acute exercise, especially when a moderate intensity exercise bout is presented before the adaptation of information (Roig et al., 2013). Even so, memory consolidation seems to also be responsive to high intensity exercise bouts (Winter et al., 2007). In fact, it seems that best enhancements on memory and learning would be obtained with higher exercise intensities due to better stimulation of the neural mechanisms related to long term potentiation and thus learning (McMorris, 2016).

Recent advances in the study of the effect of acute exercise on memory have been made towards specific types of memory, like procedural memory. Various studies have observed how acute aerobic exercise may have an important role in potentiating motor adaptation and consolidation in adults (see Taubert et al., 2015 for a review).

Motor adaptation has been observed to improve when a moderate (Snow et al., 2016; Statton et al., 2015) or high (Mang et al., 2014) intensity exercise bout was presented before practice in a motor task. However, motor consolidation improvements were greatly observed when the presented exercise intensity was high. Motor consolidation at 1h (Ferrer-Uris, Busquets, Lopez-Alonso, Fernandez-del-Olmo, & Angulo-Barroso, 2017), 24h (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012) or even 7 days (Roig et al., 2012) after adaptation have been observed to be enhanced via an intense exercise bout. But, the different timing of motor consolidation effects might be task dependent since these studies used different learning tasks. In addition, Roig et al. (2012) determined that after 7 days from adaptation, the effects were greater when the exercise bout was presented immediately after motor adaptation in comparison to when it was presented immediately before. Therefore, it seems that in adults presenting the exercise after motor adaptation, as compared to before, may further facilitate motor learning (Roig et al., 2012). While some evidence exists in adults regarding the possible enhancing effect of exercise on motor adaptation and consolidation, few studies have addressed these topics in children. To our knowledge, only one study observed that intense exercise performed after the adaptation of a new motor task (motor tracking) can potentially stimulate children motor learning by improving motor consolidation at long term (7 days) but not at 1h or 24h after the motor adaptation (Lundbye-Jensen et al., 2017). No previous evidence exists regarding motor adaptation enhancements via exercise in children. Given that only one study in children has been performed, further evidence is necessary to examine intense exercise effects on adaptation or consolidation using a different learning task. Moreover, whether

exercise should be performed before or after the learned task has not been examined in children.

In the present study we investigated the effect of a running acute intense exercise (iE) on the adaptation and retention of a rotational visuomotor adaptation task (rVMA) in children. Additionally, we investigated the effect of the presentation order of the iE and the rVMA on the retention of the motor skill. We hypothesized that (1) iE improves the learning rate of the adaptation of the rVMA, (2) iE improves the rVMA's retention process at short (1h), mid (24h) or long (7 days) term, and (3) iE immediately after the rVMA task has a greater effect on long-term retention than iE conducted before rVMA.

5.3 Materials and Methods

Thirty-three children participated in the study (21 male and 12 female) (see Tabla 5.1 for participants' background characteristics). Exclusion criteria were: prior experience with the rotational visuomotor adaptation task, left-handed, low physical activity engagement, body mass index (BMI) above obesity threshold, intellectual quotient (IQ) below 85 assessed through the Test of Nonverbal Intelligence version 2 (TONI-2), parent-reported history of neurological, psychiatric and/or physical impairment, non-corrected 20/20 vision, and current intake of medications affecting the nervous system and/or the ability to learn. Participants were randomly assigned to one of three groups depending on the presentation order of the learning task (rVMA) and the exercise bout (iE): (EX-rVMA) who performed the exercise before the learning task, (rVMA-EX) who engaged in the learning task before exercising and (CON) who rested instead of exercising after engaging in the rVMA. Participants distribution across groups was

balanced using age and fitness level, as it has been reported that these factors may impact the exercise effect on cognitive performance (Labelle et al., 2013) as well as the development of visuomotor representations (Contreras-Vidal et al., 2005).

Tabla 5.1. Groups characteristics

	EX-rVMA	rVMA-EX	CON
N	10	12	11
Sex (male/female)	7/3	8/4	6/5
Age (Years)	9.2 ± 1.1	9.1 ± 0.8	8.8 ± 0.7
Height (cm)	135.7 ± 8.7	133.3 ± 7.2	135.5 ± 6.4
Body mass (kg)	32.9 ± 7.3	31.2 ± 7.8	32.8 ± 8
BMI (kg/m ²)	17.7 ± 2.5	17.3 ± 2.7	17.7 ± 2.6
TONI-2-IQ	125.7 ± 12.6	122.0 ± 19.2	118.5 ± 16.8
VO ₂ max (ml/kg/min)	50.9 ± 4.2	51.4 ± 3.3	51.2 ± 5.6

Data are presented as mean ± SD. BMI = Body mass index; TONI-2-IQ = Test of nonverbal intelligence version 2 – Intellectual quotient.

Written consent from all participants' guardians and written assent from participants were provided prior to initiate the study. The study was approved by the Ethic Committee of Clinic Researches of the Catalan Sport Administration.

5.3.1 Procedure

Participants engaged in 4 different sessions (see Figura 5.1). Before enrolling in any of the study sessions, participants along with their guardians completed a questionnaire related to exclusion criteria. This questionnaire included the Physical Activity Readiness Questionnaire (PAR-Q) to review participants' health status, and the Spanish version of the Physical Activity Questionnaire for Children (PAQ-C) (validated by Benítez-Porres et al., 2016) reviewing participants' physical activity engagement. During the first study session, participants' intelligence level was assessed through the Test of Nonverbal Intelligence version 2 (TONI-2). Basic anthropometric parameters (height and body mass) were also obtained. Finally, fitness level (estimated VO₂max) was assessed

through the 20 meter shuttle run test (20mSRT) (Léger et al., 1988). To encourage participants' performance during the fitness test and the iE, they were asked to collect cards (one by one) containing cartoon-character pictures that would be used in the second session of the study to perform a game, so the more cards the better. During the 20mSRT beat-by-beat values for the RR intervals were registered using a Polar RS800CX (Polar Electro) at 1000 Hz frequency. A minimum of 48h delay was applied between sessions 1 and 2. At the start of session 2, participants were familiarized (familiarization set with the rVMA protocol by performing 20 trials of non-rotated practice (0°). Afterwards, a non-rotated baseline condition set (104 trials) was performed. After the baseline set, the procedure consisted of different paths for each group, implying a 60° clockwise rotated adaptation set of the rVMA task (312 trials) and a bout of intense exercise (iE), only for the two experimental groups. While EX-rVMA group performed first the iE followed by the adaptation set, participants in rVMA-EX group executed the adaptation set prior to the iE. Similar to rVMA-EX, CON group participated in the adaptation set right after the baseline set but without doing any exercise. After one hour from the end of the adaptation set, all participants performed a 60° clockwise retention set (short term retention, RT1h, 104 trials). At the end of session 2, all participants enrolled in a memory game performed with the cards they collected during the 20mSRT and the iE. No additional exercise or musical activity was permitted during the session. Sessions 3 and 4 occurred 24 h and 7 days from the end of the adaptation set. In each session, participants performed a 60° clockwise rotated retention set (mid and long term retentions, RT24h and RT7d respectively, 104 trials each).

5.3.2 Rotational visuomotor adaptation task

During the rVMA participants were seated in a quiet room, in front of a 19 inch computer screen located at 1m and at eyes' height. With their right hand, participants were asked to grasp a joystick, maintaining a claw type grip, an elbow flexion of 90° and a comfortable shoulder position while their forearm rested on a flat surface. The height and position of the joystick were adjusted to meet the position criteria. Joystick movement controlled a green dot on the screen (1x1cm). Individual targets randomly appeared on screen as red dots (1x1cm) in eight possible locations (45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 and 260°) and at a radius distance of 13 cm from the center. A new target appeared every 2s and remained visible for 750 ms. Participants were instructed to move the green dot, starting from the center of the screen, over the target (red dot) and back to the center as fast and as straight as possible in a single move. Cartesian x-y coordinates of the joystick movement and time were registered at 120Hz through a NI-6008 card (National Instruments Corporation).

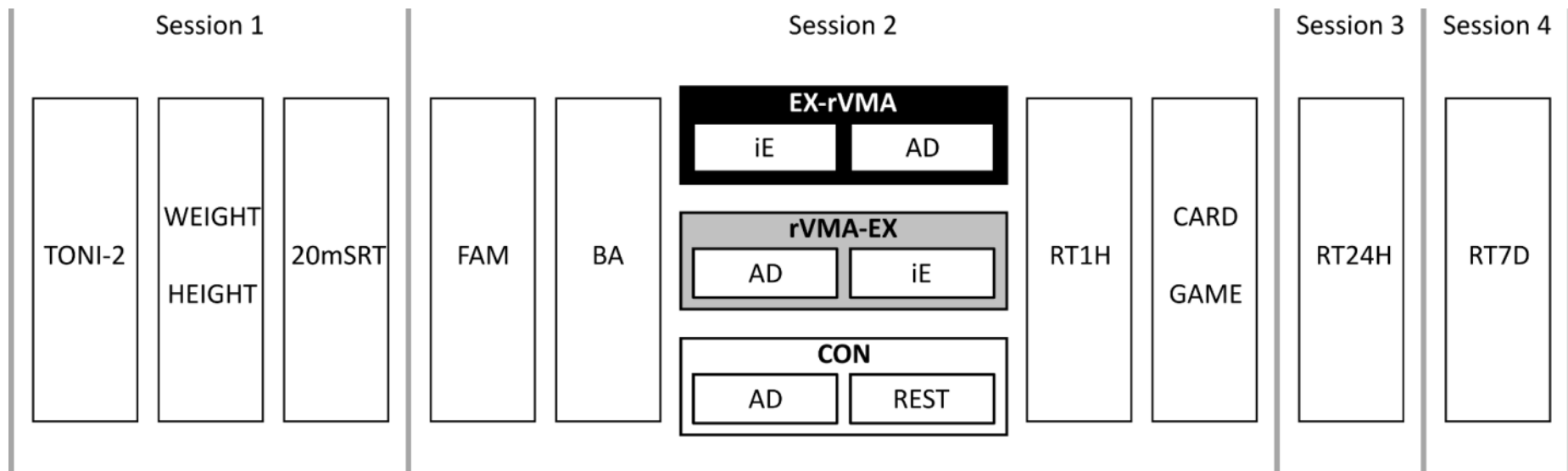


Figura 5.1. Study procedure. Schematic overview of the experimental design. TONI-2, Test Of Nonverbal Intelligence version 2; 20mSRT, 20 meter Shuttle Run Test; FAM, Familiarization set; BA, Baseline set; iE, Intense Exercise; AD, Adaptation set; RT1H, Retention set after 1 hour; RT24H, Retention set after 24 hours; RT7D, Retention set after 7 days.

5.3.3 Intense exercise

The intense exercise (iE) bout consisted of a 13 min 20-meter shuttle run. During this exercise bout two speeds based on a percentage of the estimated $VO_2\text{max}$ were combined: a fast paced speed (fast, 85% of $VO_2\text{max}$) and a slow paced speed (slow, 60% $VO_2\text{max}$). A total of 3 series of 3 min of the fast speed were carried interspersed with 2 series of 2 min of the slow speed. Prior to the iE start, a warm-up protocol consisting of 2 min slow and 1 min fast was done with the objective to familiarize participants with the iE speeds. A 5 minute rest period was guaranteed before starting the iE. Transition time between iE and rVMA was 4 min. Participants' heart rate was captured following the same procedure described for the 20mSRT.

5.3.4 Data reduction

The rVMA data fitting and reduction was done using custom-made MATLAB R2014b programs (The MathWorks, Inc.). Cartesian x-y positions were low-pass filtered using an eight-order dual-pass Butterworth filter with a cut-off frequency of 12Hz. Accepted trials fulfilled the following conditions: startup position found within 20% of the center-to-target distance, and travelled distance equal or higher to 90% of the center-to-target distance. Movement onset of the accepted trials was defined as the nearest point in an outward movement equal to a 10% of the center-to-target distance. Movement offset was defined as the first point where speed decreased to a 10% of the max speed value. Adaptation set was divided in epochs of 8 trials for analysis purposes.

5.3.5 Variables

The movement during the rVMA task was described by the calculated movement time (MT,ms), travel distance (TD, cm) and reaction time (RT,ms) variables. RT was defined

as the time between target appearance and movement onset. Movement output error was measured through the initial directional error (IDE, deg) and root mean square error (RMSE, cm) variables. IDE was calculated as the absolute angular difference between the ideal trajectory, a linear vector from the center to the target, and the early real trajectory, defined by the linear vector from the center to the green dot position at the time of 80 ms after movement onset. IDE was used as a measure of the rotation adaptation avoiding the possible trajectory correction through perceptual feedback (Contreras-Vidal et al., 2005). RMSE was calculated to represent the straightness of the movement between the ideal trajectory and the real joystick trajectory following the procedure described in Contreras-Vidal et al. (2005). Considering the large inter-subject variability usually presented by children, computed mean adaptation and retention variables were normalized by subtracting the participant's mean baseline values.

During the adaptation set, data presented an initial rapid error decay followed by a slower decline. As it has been seen in other studies (Krakauer et al., 2005) these data resulted to be best fitted by a double exponential function:

$$y = a * e^{b*x} - c * e^{d*x}$$

Where y is the error, x is the epoch number and a , b , c and d are parameters. The initial rate of learning (RL) was computed, as described in Coats (2014), as the first derivative of the first half of the function and evaluated at epoch 1 for both error variables IDE (RL-IDE) and RMSE (RL-RMSE).

5.3.6 Data analysis

Normality distribution was assumed for all variables via exploration of histograms, Q-Q plots and with the Shapiro-Wilk's normality test. When normality assumption failed, variable transformation or non-parametric alternative tests were adequately conducted. Age and estimated VO₂max measures were explored through one-way analysis of variance (ANOVA) to evaluate the group. We also compared the mean baseline value for each variable (movement time, MT; travel distance, TD; reaction time, RT; initial deviation error, IDE; and root mean square error, RMSE) with ANOVAs in order to ensure that the baseline performance was similar across the three groups. The first study hypothesis, where the effect of the iE bout on the adaptation set of the rVMA task is explored, was analyzed using a One-way ANOVA. Likewise, we also compared the rate of learning (RL-IDE and RL-RMSE) among the three groups using the Kruskal-Wallis H test. To analyze the second and third hypothesis, related to the effect of exercise and the exercise presentation order on the retentions of the rVMA task, mean values of each variable (MT, TD, RT, IDE, and RMSE) and retention set were calculated. Based on our expected results and prior evidence, and to be conservative, differences among groups for all retentions together were assessed through a two-way (Group x Set) repeated measures ANOVAs. Greenhouse-Geisser sphericity-corrected values were reported when appropriate. If a main group effect was found, control versus each of the exercise groups were compared at each retention set via planned comparison analyses for the second hypothesis. Similarly, for the third hypothesis, the exercise groups (before and after the learning task) were compared with planned comparisons. In all planned comparisons, *p* values were adjusted by the number of comparisons.

The effect size of the different tests was calculated according to Cohen (1988): d for t Test (0.2 small, 0.5 medium, 0.8 large effect) and η^2p for ANOVAs and Kruskal-Wallis H test (0.01 small, 0.06 medium, 0.14 large effect). Statistical significance was set at $p < 0.05$ for all ANOVA analyses.

5.4 Results

In order to ensure that groups were correctly balanced, we explored participants' age and fitness level ($VO_2\max$) (Tabla 5.1) along with their baseline set execution in the rotational visuomotor adaptation task (rVMA) (Tabla 5.2). The three groups resulted to be similar in both age [$F(2, 30) = 0.632$; $p = 0.539$; $\eta^2p = 0.04$] and $VO_2\max$ [$F(2, 30) = 0.035$; $p = 0.966$; $\eta^2p = 0.002$]. Baseline set's analyses revealed similar values between groups for the descriptive movement variables: movement time (MT) [$F(2, 30) = 0.113$; $p = 0.893$; $\eta^2p = 0.008$], travel distance (TD) [$F(2, 30) = 2.378$; $p = 0.110$; $\eta^2p = 0.137$], and reaction time (RT) [$F(2, 30) = 2.226$; $p = 0.126$; $\eta^2p = 0.129$]. Likewise, the error variables from the rVMA baseline set were similar for the three groups: initial directional error (IDE) [$F(2, 30) = 0.556$; $p = 0.573$; $\eta^2p = 0.036$] and root mean squared error (RMSE) [$F(2, 30) = 1.445$; $p = 0.252$; $\eta^2p = 0.088$]. The lack of significant differences among groups for the participants' characteristics and for the baseline set values suggested that groups were effectively balanced during the randomization and that they produced comparable movement patterns and performance during baseline.

Tabla 5.2. Mean raw values of the performance variables on the rotational visuomotor adaptation task (rVMA) for each group and set.

	EX-rVMA	rVMA-EX	CON
Baseline			
MT (ms)	196.15 ± 28.64	201.62 ± 41.07	195.72 ± 26.41
TD (cm)	6.85 ± 0.32	6.97 ± 0.32	6.67 ± 0.36
RT (ms)	404.15 ± 36.97	385.95 ± 42.59	419.14 ± 32.54
IDE (deg)	12.44 ± 6.08	12.57 ± 4.48	10.67 ± 3.26
RMSE (cm)	0.90 ± 0.20	0.92 ± 0.12	0.83 ± 0.06
Adaptation			
MT (ms)	199.04 ± 26.70	227.16 ± 38.87	214.39 ± 38.35
TD (cm)	7.00 ± 0.31	7.06 ± 0.28	6.83 ± 0.27
RT (ms)	408.23 ± 46.82	384.48 ± 37.49	423.11 ± 45.03
IDE (deg)	28.67 ± 6.01	30.79 ± 7.32	32.38 ± 7.94
RL-IDE	-4.09 ± 4.65	-4.44 ± 3.26	-6.10 ± 5.74
RMSE (cm)	2.00 ± 0.34	2.05 ± 0.49	2.20 ± 0.58
RL-RMSE	-0.49 ± 0.28	-0.38 ± 0.18	-0.58 ± 0.85
Retention 1h			
MT (ms)	204.79 ± 30.48	200.72 ± 24.77	193.51 ± 31.14
TD (cm)	7.06 ± 0.34	7.31 ± 0.22	7.00 ± 0.31
RT (ms)	418.07 ± 45.40	398.05 ± 35.11	432.09 ± 41.01
IDE (deg)	17.43 ± 3.40	20.72 ± 5.35	24.04 ± 10.14
RMSE (cm)	1.32 ± 0.18	1.52 ± 0.35	1.71 ± 0.54
Retention 24h			
MT (ms)	211.88 ± 33.80	193.54 ± 25.72	194.72 ± 31.35
TD (cm)	7.16 ± 0.35	7.35 ± 0.28	7.27 ± 0.45
RT (ms)	414.44 ± 48.04	413.60 ± 36.18	427.44 ± 30.95
IDE (deg)	17.02 ± 4.28	19.85 ± 4.86	23.49 ± 7.42
RMSE (cm)	1.33 ± 0.25	1.57 ± 0.35	1.76 ± 0.45
Retention 7 days			
MT (ms)	203.87 ± 31.36	198.65 ± 31.60	195.37 ± 33.96
TD (cm)	7.30 ± 0.31	7.44 ± 0.39	7.27 ± 0.34
RT (ms)	406.93 ± 51.39	404.47 ± 32.84	422.40 ± 42.60
IDE (deg)	17.72 ± 4.41	19.67 ± 7.00	21.32 ± 7.90
RMSE (cm)	1.33 ± 0.25	1.57 ± 0.35	1.76 ± 0.45

Data are presented as mean ± SD. EX-rVMA, rVMA after exercise group; rVMA-EX, rVMA before exercise group; CON, no exercise group; MT, movement time; TD, travel distance; RT, reaction time; IDE, initial directional error; RMSE, root mean squared error; RL, rate of learning.

To explore the impact of the intense exercise (iE) during the rVMA adaptation set we conducted ANOVAs or non-parametric alternative tests when required. Movements executed by the three groups were similar as shown by the movement descriptive variables. No significant differences were found for MT [$F(2, 30) = 1.619$; $p = 0.215$; $\eta^2 p = 0.097$], TD [$F(2, 30) = 0.308$; $p = 0.738$; $\eta^2 p = 0.020$], and RT [$F(2, 30) = 0.120$; $p = 0.888$; $\eta^2 p = 0.008$]. The statistical analyses of the IDE [$F(2, 30) = 1.731$; $p = 0.194$; $\eta^2 p = 0.103$] and RMSE [$F(2, 30) = 1.150$; $p = 0.330$; $\eta^2 p = 0.071$] showed similar performance among groups (Figura 5.2). Comparisons of the rates of learning were assessed through Kruskal-Wallis H test. Comparable results were found for both error variables: RL-IDE ($\chi^2(2) = 0.287$; $p = 0.866$; $\eta^2 p = 0.011$) and RL-RMSE ($\chi^2(2) = 1.320$; $p = 0.517$; $\eta^2 p = 0.049$). These no significant differences in the adaptation set among groups indicated that movement execution and especially errors across trials were not affected by the iE.

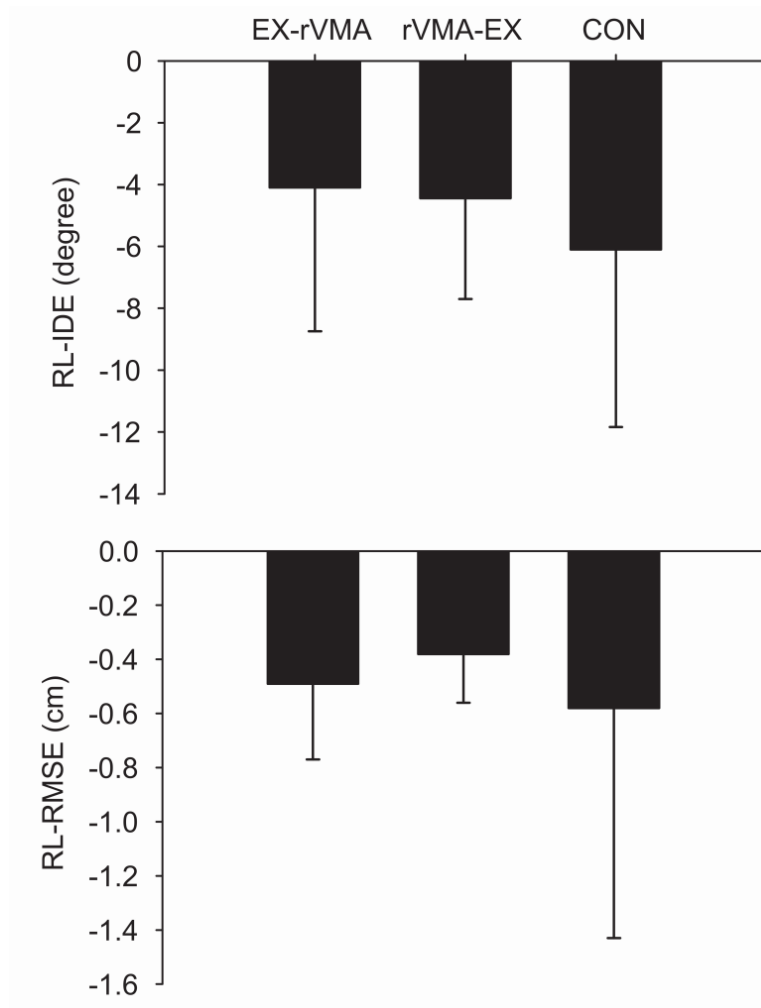


Figura 5.2. Mean rate of learning during adaptation. Mean and standard deviations of the Rate of learning of the rotational visuomotor adaptation task (rVMA) during the adaptation set. Rate of learning of both error variables, initial deviation error (IDE) and root mean squared error (RMSE), were calculated. EX-rVMA, rVMA after exercise group; rVMA-EX, rVMA before exercise group; CON, no exercise group.

The effect of the exercise on the retention sets (short, RT1; mid, RT24; and long-term, RT7d) (Tabla 5.2) was evaluated through repeated measures ANOVAs. No group differences were found for the movement descriptive variables: MT [$F(2, 30) = 0.559$; $p = 0.577$; $\eta^2 p = 0.036$], TD [$F(2, 30) = 0.522$; $p = 0.598$; $\eta^2 p = 0.034$], and RT [$F(2, 30) = 0.717$; $p = 0.496$; $\eta^2 p = 0.205$]. However, a significant group difference was found for both error variables: IDE [$F(2, 30) = 4.485$; $p = 0.02$; $\eta^2 p = 0.230$] and RMSE [$F(2, 30) =$

4.845; $p = 0.015$; $\eta^2 p = 0.244$]. In both error variables group planned comparisons to examine exercise versus control effects revealed a significant difference between the EX-rVMA group and the CON group (IDE: $t(19) = 2.967$; $p = 0.008$; $d = 1.300$, and RMSE: $t(14.875) = 3.216$; $p = 0.006$; $d = 1.385$) but no differences between rVMA-EX and CON groups (Figura 5.3). When examining the set planned comparisons, significant lower IDE values were observed for the EX-rVMA group when compared to CON group during RT1 ($t(19) = 2.646$; $p = 0.016$; $d = 1.172$) and RT24 ($t(19) = 3.189$; $p = 0.005$; $d = 1.392$). Similarly, lower RMSE values were observed for EX-rVMA group when compared to CON during RT24 ($t(19) = 3.184$; $p = 0.005$; $d = 1.409$) and RT7d ($t(19) = 2.676$; $p = 0.015$; $d = 1.186$). No other differences were found when comparing rVMA-EX group with CON group.

The presentation order effect was examined by a group planned comparison between the exercise groups. No differences were found when comparing the EX-rVMA and rVMA-EX groups.

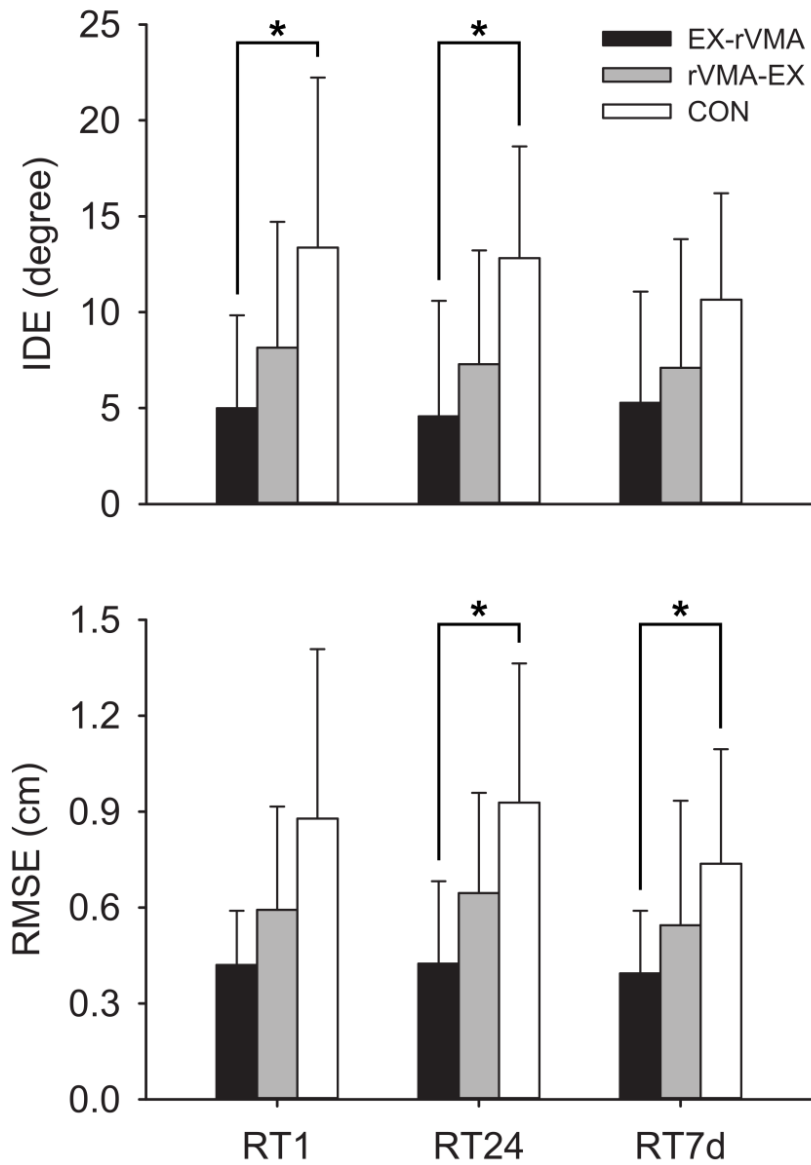


Figure 5.3. Error performance during short, mid and long retentions. Error values of the rotational visuomotor adaptation task (rVMA) during the retention sets (short, RT1h, mid, RT24h, and long-term retention, RT7d), expressed by normalized means and standard deviations. Significant differences between groups were represented by (*). IDE, initial directional error; RMSE, root mean squared error; EX-rVMA, rVMA after exercise group; rVMA-EX, rVMA before exercise group; CON, no exercise group.

5.5 Discussion

The goal of the present study was to assess the effect of an acute bout of intense exercise (iE) on the adaptation and consolidation of a visuomotor adaptation task (rVMA) in children. Moreover, we aimed to observe the presentation order effect of the iE bout and the rVMA task.

Our first hypothesis sought to evaluate the possible positive effect of the high intensity exercise bout on the adaptation of the rVMA task. This hypothesis was based on previous research where a high intensity exercise bout improved adaptation of the temporal components of a motor task in adults (Mang et al., 2014). Results did not support our hypothesis given that no enhancement due to exercising was observed neither on the overall error or the Rate of learning (RL) of the IDE and RMSE variables nor on the movement descriptive parameters (MT, TD and RT).

Similar results in adults were presented by Roig et al. (2012), who found that high intensity exercise had no effect during the adaptation of a tracking task. These authors reported that exercise intensity and duration may have generated some fatigue level, which could have hindered the possible exercise benefits during the adaptation of the motor task. Another possible explanation of this phenomenon could be the upregulating effect of exercise intensity on arousal level, which seems to follow an inverted-U pattern (McMorris & Hale, 2012). According to this pattern, low exercise intensities may have little to no effect on cognitive performance, moderate intensity exercise would induce the greatest benefits, and excessive exercise intensity could have a disruptive or null effect, a phenomenon known as neural noise (McMorris & Hale, 2012). The cognitive performance improvement after moderate intensity

exercise may be explained by an exercise-induced raise in the level of arousal and a consequent elevation on catecholamine secretion (i.e. epinephrine, norepinephrine and dopamine) (McMorris, 2016; McMorris & Hale, 2012). Reviews of the studies conducted with children (St-Louis-Deschênes & Elleberg, 2011; Tomporowski, McCullick, Pendleton, et al., 2015) have ratified this exercise intensity-arousal level relation, showing that the best cognitive enhancements are attained when exercise intensity remains at a moderate level. However, it has been seen that exercise intensity and catecholamine secretion effects are task dependent (McMorris, 2016). Higher exercise intensities would produce greater catecholamine secretion that seems to impair central executive functioning, while benefiting storage of information into long term memory through long term potentiation, thus enhancing learning (McMorris & Hale, 2012; Winter et al., 2007).

In adults, exercise intensity has also shown to modulate the exercise effect on the adaptation of procedural information. Moderate intensity (60% of peak O₂ uptake or 65-85% of maximum heart rate) exercise bouts ranging between 30 and 35 minutes duration, have been observed to enhance motor adaptation but not motor consolidation (Snow et al., 2016; Statton et al., 2015). Provided that other studies observed a null effect of a more intense exercise bout on motor adaptation but an enhancing effect on motor consolidation (Roig et al., 2012), it seems that moderate exercise intensity would elicit the greatest benefits when only aiming to facilitate adaptation of a motor skill. Conversely, higher exercise intensities would favor motor consolidation instead (Taubert et al., 2015).

However, the hypothesis regarding adaptation was based on the evidence that even when exercise intensity is high, exercise prior to motor adaptation can lead to improvements in some components (e.g. temporal components) of motor adaptation in adult participants (Mang et al., 2014). In the present study, the lack of differences among groups limits further speculation on the subject. Other factors besides exercise intensity could have determined the magnitude of the exercise effect on temporal parameters during the adaptation set. One of the principal differences between Mang's study and ours is the motor task paradigm utilized. It is known that different task paradigms (e.g., motor sequence learning vs motor adaptation) engage different brain areas during learning (Doyon et al., 2003), which could have had modulated the exercise effect. Therefore the utilized rVMA task characteristics may be seen as a potential moderator of the exercise effect on motor adaptation.

Secondly, based on adult studies where high intensity exercise enhanced motor consolidation (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012), we hypothesized that exercise would enhance motor consolidation (second hypothesis) and that participants who exercised after the adaptation set would present the greatest improvement (third hypothesis). When effects of exercise bout on short, mid and long term retentions (RT1h, RT24h and RT7d) were examined, we found that the proposed high intensity exercise, especially when performed before the adaptation set, had an enhancing effect on the consolidation of the motor skill. Compared to the CON group, participants in the EX-rVMA group exhibited lower IDE values during the short (RT1h) and mid-term (RT24h) retentions and lower RMSE values during mid (RT24) and long-term (RT7d) retentions. Improvements in the IDE may reflect an enhancement of the motor planning, which represents the state of consolidation of the internal model of

the motor skill (Contreras-Vidal et al., 2005). Gains in RMSE indicate that exercise also affected the movement straightness. Movement straightness comprehends the initial deviation from the ideal trajectory (IDE) and the remaining movement trajectory, which could be corrected using perceptual feedback. Therefore, we consider that improvements in the RMSE in participants in the EX-rVMA group may reflect that exercise had an impact not only in the motor planning of the movement, but also in the utilization of the perceptual feedback. Then, we could interpret that improvements in the short (RT1h), mid (RT24) and long-term (RT7D) retentions may indicate that the exercise intervention contributed to enhance the motor planning of the skill and the usage of the feedback-guided corrections.

Given the improve in consolidation of motor memory observed in participants of the EX-rVMA group, we think that the high intensity exercise presented prior to the visual motor task contributed to improve motor learning. Our results agree with previous research conducted with children, where acute exercise presented before a free-recall memory task enhanced its recall score and its consolidation (Pesce et al., 2009). Furthermore, other studies conducted with adult population have found improvements in both declarative memory (Winter et al., 2007) and motor memory consolidation (Ferrer-Uris et al., 2017; Mang et al., 2014; Roig et al., 2012) when preceded by an intense bout of exercise. In particular for the motor learning tasks, exercise presented prior to adaptation seems to improve its short (Ferrer-Uris et al., 2017), mid (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012) and long term retentions (Roig et al., 2012). These improvement in memory consolidation seem to be associated to an exercise-induced stimulation of the learning-related neuroplasticity mechanisms which could be triggered by an elevation of catecholamines (epinephrine, norepinephrine

and dopamine) and neurotrophins (especially BDNF) (McMorris, 2016; Taubert et al., 2015). It seems that concentration increases in norepinephrine and BDNF may be triggered by intense exercise and could have an important role in memory consolidation processes (e.g. Long term potentiation) (McMorris, 2016). Adult studies report that a high intensity exercise bout positively contributes to serum catecholamine (specially norepinephrine) and BDNF elevation, which were related to improvements in the consolidation of declarative (Segal, Cotman, & Cahill, 2012; Winter et al., 2007) or procedural memory (Mang et al., 2014; Skriver et al., 2014). However, difficulties to measure central concentration levels of these neurochemical compounds limits our knowledge of the concrete mechanisms that promote exercise effects on neuroplasticity. In addition, there is a lack of research in exercise-related effects on catecholamine and BDNF concentration in children and their association with learning. This situation limits our speculation on the mechanisms that may have helped motor memory consolidation in children in the present study. Therefore, more research on the concrete mechanisms that induce memory consolidation improvements via acute exercise will be needed, especially in children.

In contrast to the EX-rVMA group, rVMA-EX group exhibited similar performance in comparison to CON group. Likewise, when we compared both exercise groups, similar performances were observed in any of the error variables or retention sets. Therefore, the performance of the rVMA-EX group seems to be in an intermediate step between the performances of the CON and the EX-rVMA groups. Consequently, we could think that exercise may have had some enhancing effect on the consolidation process of the motor skill in the rVMA-EX group, but that this contribution was not enough to outperform the CON group. Enhancements in children motor consolidation

have been previously observed when exercise was presented after the adaptation of a motor task (Lundbye-Jensen et al., 2017). However, in this study (Lundbye-Jensen et al., 2017) the effect of exercise presented prior to the adaptation of the motor skill was not analyzed, which seems to elicit greater improvements in motor consolidation as observed in the present study.

Based on the findings of Roig et al. (2012) in adults, we hypothesized that both exercise groups would benefit from exercise, but that exercise presented after adaptation (rVMA-EX group) would have a greater enhancing effect on the long-term retention set than exercise presented before adaptation (EX-rVMA). The fact that exercise presentation order elicited different results in the present study in comparison to Roig et al. (2012) could indicate that exercise benefits on memory consolidation could be moderated by age. A possible explanation of these controversial results might be an existing age-dependent divergence in motor memory consolidation. In comparison to the relatively slow and selective consolidation process of adults, motor memory consolidation of pre-adolescent children undergoes a faster and less selective process (Dorfberger, Adi-Japha, & Karni, 2007). This age-dependent divergence in motor memory consolidation could partly explain the reduced effect of exercise on participants in rVMA-EX group in comparison to EX-rVMA group. Elevation of the arousal level and the consequent increase of catecholamine and BDNF prior to the adaptation of the motor task would benefit the faster motor consolidation process of children, especially during early consolidation stages. Thus, it seems that the presentation order of the motor adaptation and the exercise bout in the participants of the rVMA-EX group, could have reduced the bio-availability of the plasticity-related mechanisms triggered by the exercise bout during the early consolidation stages.

Moreover, availability of plasticity-related neurochemicals during consolidation could explain differences between Roig et al. (2012) and the present study. While children would have benefited from an early presence of neurochemicals, adults might have profited from exercising post adaptation, allowing an increased neurochemical presence during later consolidation stages.

Another possible explanation for the different consolidation effects caused by the presentation order of the motor task and the exercise bout could be related to the possible enhancement of the adaptation process itself. In the present study, improvements were only observed during the retention sets of the motor task for the EX-rVMA, which are usually interpreted as consolidation enhancements (Lundbye-Jensen et al., 2017; Mang et al., 2014; Roig et al., 2012). However, although we could not observe improvements in performance during the adaptation of the motor skill when it was preceded by the exercise bout, it would be reasonable to think that gains during adaptation could be manifested during the retention sets of the motor task. Previous research has observed improvements in the adaptation and consolidation of a motor skill in adults when preceded by an intense exercise bout (Mang et al., 2014). Therefore, it could be feasible to think that adaptation improvements, which could have been masked by the exercise-induced fatigue, could partially contribute to the exercise induced improvements in the retention sets in the EX-rVMA group, a fact that it is not possible for the rVMA-EX group.

However, the effect of exercise and learning task presentation order is still poorly understood. Despite the findings of Roig et al. (2012) where exercise post adaptation elicited the greatest long-term benefits, there are few studies which have evaluated

this presentation order effect. Some of these studies even present contradictory results, where best enhancements were attained when exercise was presented before a declarative learning task rather than after (Labban & Etnier, 2011; Salas, Minakata, & Kelemen, 2011). Furthermore a recent review observed how greater effects were obtained when acute exercise was presented before adaptation of declarative or procedural information (Roig et al., 2013). However, the lack of delayed retention tests in most of the studies included in the review limits our understanding of exercise timing as an exercise effect moderator. Therefore, further research utilizing different exercise types or learning tasks is needed to better define the moderator effect of exercise timing, especially in children where this is, to our knowledge, the first study addressing this issue.

Despite presenting new evidence regarding motor learning enhancement via exercise in children, there are several limitations to the interpretation of the present results that may drive future research. A relatively small sample size was utilized in this study, which limits statistical power. Greater effects would be expected in case of bigger sample sizes, especially when exercise is presented after the learning task. Furthermore, generalization of the results could not be extrapolated to pediatric obese population given that obese children were excluded. Moreover, this study was based on the analysis of behavioral outcomes, which limits further insight in other learning-related mechanisms triggered by the exercise bout. Because our knowledge regarding the mechanisms involved in the exercise-induced stimulation on cognitive function and learning in children is scarce, future research should also address this topic.

5.6 Conclusions

In summary, the bout of exercise presented in this study facilitated motor memory consolidation maximizing its effects when exercise was presented before motor adaptation. Therefore, we would like to suggest that stimulation of motor memory consolidation through acute exercise may be positively applied to strengthen children's motor learning. Despite positive effects on consolidation, exercise could not enhance motor adaptation. It seems possible that a combination of high arousal levels, fatigue and/or the learning task characteristics could have impaired or masked the exercise benefits on motor adaptation. Further research will be needed to investigate the concrete effects of different exercise protocols (different intensity or exercise duration) on children's motor learning. Moreover, studies examining the underlying mechanisms of the exercise facilitation on children's motor learning will be necessary.

5.7 Acknowledgments

This study was supported by Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC) from the Generalitat de Catalunya, Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (AGAUR) (PRE/2623/2013), and by Grup de Recerca en Activitat Física i Salut (GRAFIS, Generalitat de Catalunya 2014SGR/1629).

Capítulo 6: Estudio 3 - Enhancing children's motor consolidation through acute intense exercise: effects of different exercise durations

Autores: Blai Ferrer-Uris, Albert Busquets, Rosa Angulo-Barroso



6.1 Abstract

Adult's and children's motor learning has been observed to improve through acute intense exercise. In adult, evidence suggests that exercise characteristics, like exercise intensity or duration, play a major role modulating the exercise effect on motor memory consolidation. However, little is known about the effect of short exercise bouts on motor memory consolidation, especially in children. In this study, we aimed to assess the effect of a long (13 min) and short (5 min) intense exercise bout on the adaptation and consolidation of a rotational visuomotor adaptation task. Seventy-one active and healthy children from two different Sites participated in the study and were divided in three groups: long exercise bout before the learning task (LONG), short exercise bout before the learning task (SHORT), and learning the task only (CON). Before applying any rotation to the motor task (0° rotation), children's baseline was assessed. Afterwards, children performed the rotated (clockwise 60° rotation) motor task in four different occasions: an adaptation set and three delayed retention sets (1 h, 24 h and 7 days from the adaptation set). Results showed no group differences in motor adaptation. However, both exercise groups (LONG and SHORT) improved their motor consolidation compared to CON group ($F_{(2, 68)} = 7.102$; $p = 0.002$; $\eta^2 p = 0.175$). While the SHORT group improved execution only in the retention 24 h after motor adaptation, the LONG group also improved performance in the retentions sets at 1 h and 7 days from adaptation. These results indicated that a short bout of exercise is sufficient to improve motor memory consolidation, although longer exercise bouts seemed to exert more sustained effects. Short exercise bouts may be suitable to improve children's motor consolidation in environments where time constraints exists and where new motor skills have to be learned, like in school or sport practice.

6.2 Introduction

During our childhood we learn many motor skills that are recalled throughout our life time. The recall/retention of a motor skill depends on its consolidation into the so called long-term memory, which requires some adaptation and efficient use of the perceived sensorial information. Recent research has shown that exercise has the potential to protect motor memory formation from external interferences during consolidation (Rhee et al., 2015) and that both processes, motor adaptation and motor consolidation, can be enhanced by a single bout of exercise in adults (reviewed in: Roig et al., 2016; Taubert, Villringer, & Lehmann, 2015). Therefore, it seems that exercise could be used to enhance motor learning in children, with some possible positive applications in school, recreation, or sport settings.

In adults, motor adaptation and consolidation have been observed to be enhanced when presenting an exercise bout in close temporal relation to the practice of the to be learned motor task (Taubert et al., 2015). It seems that moderate intensity exercise presented before the practice of the task facilitates motor adaptation by improving the movement accuracy (Snow et al., 2016; Statton et al., 2015). On the other hand, an increasingly amount of studies have found improvements in motor consolidation when an intense exercise bout has been presented before or after the adaptation of the motor task (Mang, Snow, Campbell, Ross, & Boyd, 2014; Mang, Snow, Wadden, Campbell, & Boyd, 2016; Roig, Skriver, Lundbye-Jensen, Kiens, & Nielsen, 2012; R. Thomas et al., 2016). In the study 1 of this thesis, we observed that exercise improved motor memory consolidation whether it was presented before or after the adaptation of a rotational visuomotor adaptation task (rVMA). These exercise-induced increases in

motor consolidation in adults have been observed to correlate with elevations in corticospinal excitability (Ostadan et al., 2016) and increases in catecholamines and neurotrophins (Mang et al., 2014; Skriver et al., 2014); all biomarkers that have been associated with memory consolidation processes like long-term potentiation (Bekinschtein et al., 2008; Ziemann et al., 2004). Thus, it seems that exercise could improve memory consolidation through the stimulation of plasticity related mechanisms.

Studies observing exercise-induced benefits on motor learning in adults add evidence to the already known benefits of exercise on cognitive function and declarative memory (Roig et al., 2013; Tomporowski, 2003). Like in the adult population, there is also evidence that relates fitness level and exercise practice with better cognitive performance and academic performance in children (Castelli et al., 2007; Khan & Hillman, 2014; Pesce & Ben-Soussan, 2016). Furthermore, it seems that exercise would also facilitate memory formation and learning in children (Etnier, Labban, Piepmeier, Davis, & Henning, 2014; Pesce et al., 2009). These exercise-induced benefits have also been associated with neural correlates, like increases in the volume of certain brain structures (Chaddock, Erickson, Prakash, Kim, et al., 2010; Chaddock, Erickson, Prakash, Vanpatter, et al., 2010; Chen, Zhu, Yan, & Yin, 2016). However, despite the considerable volume of research regarding the exercise effects on children's cognitive function and adult's motor learning, little is known about the effects of exercise on children's motor learning.

To our knowledge, the only evidences of the effects of exercise on children motor consolidation comes from the study 2 of the present thesis and a recent publication by

Lundbye-jensen, Skriver, Nielsen, & Roig (2017). In the study 2 of the thesis, we analyzed how a bout of intense exercise presented immediately after or before the practice on the rVMA affected motor adaptation and motor consolidation. We observed that exercise enhanced motor consolidation especially when it was presented immediately before the motor adaptation. Similarly, Lundbye-jensen, Skriver, Nielsen, & Roig (2017) found that intense exercise enhanced motor consolidation when it was presented after the adaptation of a motor task, no matter the type of exercise (only running or playing a collective game). Although exercise enhanced motor consolidation in the study 2 of this thesis, adaptation seemed to remain unaffected by the exercise bout. As proposed in previous adult research (Roig et al., 2012; Thomas, Johnsen, et al., 2016), we suggest that exercise characteristics (e.g. exercise timing, intensity, and duration) play an important role in the modulation of the exercise-induced benefits on motor adaptation and consolidation.

Exercise intensity seems to be an important modulator in the exercise-motor learning relation for adults. Evidence suggests that while moderate exercise would mainly improve motor adaptation (Snow et al., 2016; Statton et al., 2015), intense exercise would grant better improvements in motor consolidation (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012; Thomas, Johnsen, et al., 2016). While intensity-related modulation of exercise benefits on motor learning has accumulated sufficient evidence, there is limited knowledge regarding the modulator effect of exercise duration. To date, most studies examining the effect of moderate exercise on motor learning have used diverse protocols with durations of 30 minutes (Snow et al., 2016; Statton et al., 2015). In contrast, the majority of the studies analyzing the effect of intense exercise on motor learning have used exercise protocols of similar duration (around 13 min of intense

interval exercise). To our knowledge, no study has compared the effect of different exercise duration protocols of equal intensity. Furthermore, the effect of a shorter exercise intervention, yet of equal intensity, on the learning of a motor skill is not known, much less in a pediatric population.

Unlike the literature void for short exercise bout and motor learning, there are some examples of previous research that has studied the effect of short exercise bouts on human cognition. In adults, two sprints of 3 min separated by 2 min rest enhanced the rate of acquisition of a novel vocabulary task and its retention when related to increases in neurochemical concentrations post-exercise (Winter et al., 2007). In children, Etnier et al. (2014) observed improvements in a novel vocabulary task and its recall after performing the 20-meter shuttle run test (Léger et al., 1988). Moreover, some school-based exercise strategies of 10 min or less have been proposed in order to improve children's on-task attention, which resulted in positive outcomes (Ma, Le Mare, & Gurd, 2014; Mahar et al., 2006). Therefore, it seems that exercise interventions of short duration could also show some promising results enhancing motor learning, although their possible impact may not be as high as with longer exercise bouts of equal intensity. Evidence of positive effects of short exercise bouts on motor learning, would open new possibilities for the applicability of these kinds of interventions in school, recreational, and sport settings, where the optimization of children motor learning is of high relevance.

In the present study, we investigated the effect of two different intense exercise (iE) interventions (a short bout of only 5 min, and a long bout of 13 min) on the adaptation and retention of the rotational visuomotor adaptation task (rVMA). We hypothesized

that (1) iE would not enhance the adaptation of the rVMA, (2) the long iE would enhance consolidation of the rVMA, and (3) the short iE would also improve consolidation of the rVMA although presenting a smaller effect compared to the long iE.

6.3 Materials and Methods

Seventy-one children were recruited from two different schools located in Barcelona, Spain (Site 1) and Los Angeles, USA (Site 2) (40 male and 31 female) (see Tabla 6.1 for participants' background characteristics). Participants were excluded from the study whether one or more of the following conditions were present: prior experience with the (rVMA), left-handed, low physical activity engagement, Body Mass Index (BMI) above obesity level, intelligence level below average, parent-reported history of neurological, psychiatric and/or physical impairment, non-corrected 20/20 vision, and current intake of medications affecting the nervous system and/or the ability to learn. Participants were randomly assigned to one of three experimental groups: (LONG) participants exercised for 13 min before practicing the learning task, (SHORT) participants exercised for 5 min before practicing the learning task and (CON) who rested before engaging in the learning task. Data collection conducted in Los Angeles distributed participants into the three groups (LONG, SHORT or CON) while the data collection carried out in Barcelona only allocated participants in the LONG or CON groups. Participants' aleatory distribution was separately checked at each Site using age and fitness level as stratification factors because it has been reported that these two factors may impact the exercise effect on cognitive performance (Labelle et al., 2013) as well as the development of visuomotor representations (Contreras-Vidal et

al., 2005). Identical materials and data collection and reduction procedures were used in both Sites.

Tabla 6.1. Groups characteristics

	LONG			SHORT	CON		
	Site 1	Site 2	Site 1+2	Site 2	Site 1	Site 2	Site 1+2
N	10	17	27	19	11	14	25
Sex (male/female)	7/3	8/9	15/12	11/8	6/5	9/5	15/10
Age (years)	9.16 ± 1.1	9.28 ± 0.7	9.24 ± 0.9	9.19 ± 0.9	8.78 ± 0.7	9.10 ± 0.6	8.96 ± 0.7
Height (cm)	135.66 ± 8.7	138.06 ± 7.2	137.17 ± 7.7	135.97 ± 7.6	135.45 ± 6.4	132.51 ± 5.1	133.80 ± 5.8
Body mass (kg)	32.90 ± 7.3	32.61 ± 6.8	32.71 ± 6.9	34.85 ± 8.5	32.82 ± 8.0	29.78 ± 0.7	31.11 ± 7.4
BMI (kg/m ²)	17.72 ± 2.5	17.04 ± 3.0	17.29 ± 2.8	18.65 ± 3.2	17.67 ± 2.6	16.90 ± 3.5	17.24 ± 3.1
Estimated VO ₂ max (ml/kg/min)	50.90 ± 4.2	46.16 ± 2.0	47.91 ± 3.7	44.80 ± 2.9	51.19 ± 5.6	45.36 ± 2.9	47.93 ± 5.1

Abbreviations: LONG = Long exercise bout group; SHORT = short exercise group; CON = no exercise group; BMI = Body mass index

Consent from all participants' guardians and assent from participants were provided prior to initiate the study. The study was approved by the Ethic Committee of Clinic Researches of the Catalan Sport Administration and the Committee for the Protection of Human Subjects of the California State University, Northridge.

6.3.1 Procedure

A total of four sessions were accomplished by each participant (see Figura 6.1 for a schematic overview). Prior to the start of the first study session, children, with the help of their guardians, assessed their physical activity engagement level using the English or Spanish version of the Physical Activity Questionnaire for Children (PAQ-C) (Benítez-Porres et al., 2016; Kowalski, Crocker, & Faulkner, 1997). In addition, guardians were asked to answer the Physical Activity Readiness Questionnaire for their children to prevent participation in the study when a contraindication to exercise existed.

Session 1		
Basic anthropometry, TONI-2, 20mSRT		
Session 2		
rVMA baseline		
LONG	SHORT	CON
Long iE	Short iE	Rest
rVMA adaptation		
rVMA retention 1h		
Memory game		
Session 3		
rVMA retention 24h		
Session 4		
rVMA retention 7 days		

Figura 6.1. Study procedure. Schematic overview of the procedure of the four study sessions. Abbreviations: TONI-2, Test of Nonverbal intelligence; 20mSRT, 20 meter shuttle run test; rVMA, rotational visuomotor adaptation task; LONG, long exercise bout before the rVMA task; SHORT, short exercise bout before the rVMA task; CON, no exercise before the rVMA task; iE, intense exercise.

In the first session, basic anthropometric characteristics (height and weight), intelligence level and fitness level (estimated $VO_2\max$) of the children were assessed. Intelligence level was assessed using the latest version of the Test of Nonverbal Intelligence (TONI) available (version 4 for the American sample and version 2 for the Spanish sample). Fitness level was evaluated using the 20-meter shuttle run test (20mSRT) (Léger et al., 1988). Beat-by-beat values for the RR intervals were collected with a Polar RS800CX (Polar Electro) at 1000 Hz frequency. To encourage participants' exertion during the test, they were asked to transport a collection of pictured cards,

one by one, from one side of the field to the other. In addition, to help maintain the test running pace and to provide encouragement, a young fit adult accompanied the children running beside them. Participants were aware that these cards would be used in a memory game (only as incentive for the participants) at the end of session 2 and that the more cards they could collect during the 20mSRT the better they could perform the game. After at least 48h from the first study session, participants started the second session by being familiarized with the rVMA task. During this familiarization, 20 trials of non-rotated practice (0°) were performed by participants after being informed of the goals and rules of the task. After familiarization, a baseline set (BA) of 104 trials was conducted to assess the initial performance in the rVMA task. When the BA finished, participants in both exercise groups engaged in an exercise bout. To ensure equal times among groups between the BA and the next practice set in the rVMA task, the SHORT group rested for 8 min before starting their exercise bout. The transition time between the exercise and the next rVMA set was 4 minutes for both exercise groups. Participants in the CON group had a rest period of 25 min while other participants exercised, where they were allowed to read or hold a conversation. Immediately after the end of the exercise bout or the rest period, participants practiced in the adaptation set (AD) of the motor skill which was composed by a total of 312 trials rotated 60° clockwise. After 1 hour rest, all participants practiced again in the rVMA task in the first retention set (RT1h) for 104 60° clockwise rotated trials. At the end of session 2, all participants played the memory game with the cards they collected during the 20mSRT and the iE (see details below in the 'Intense exercise' section). To ensure that the CON participants could equally play the game, they were provided with double the cards they had collected during the 20mSRT. Participants

were not allowed to participate in any exercise or musical activity during the rest periods. During the third and fourth sessions, participants practiced again in the rVMA task in a 60° clockwise rotated retention set 24 h and 7 days (RT24h and RT7d, 104 trials each) after the AD set.

6.3.2 Rotational visuomotor adaptation task

The rotational visuomotor adaptation (rVMA) task was conducted in a quiet room, where participants were seated 1 meter away from a 19 inch screen, elevated at participants' eyes height. Participants were asked to rest their right forearm over a height adjustable flat surface so a 90° elbow flexion and a comfortable shoulder position were maintained. They also were asked to grasp a joystick using a claw type grip and to maintain this grip during all trials of each set. A green dot (1 x 1 cm) was controlled across the screen using the joystick. The Cartesian coordinates of the movement of the cursor were registered at 120Hz using an A/D NI-6008 card (National Instruments Corporation). Every 2 seconds a new target appeared on the screen represented by a red dot (1 x 1 cm) which was only visible during 750 ms. Target dots randomly appeared at a radius distance of 13 cm from the screen center in one of eight possible positions (45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 and 360°). Starting from the screen center position, participants were instructed to run the cursor over the red dot doing one single move "as fast and as straight as possible" and then to move back to the screen center.

6.3.3 Intense exercise

Two different protocols for the intense exercise (iE) bout were programmed, a long iE and a short iE. The iE procedure was similar to the one used in the 20mSRT but with

fixed running intensities and volumes. During both exercise bouts two speeds based on a percentage of the estimated $VO_2\text{max}$ were combined: a fast paced speed (fast, 85% of $VO_2\text{max}$) and a slow paced speed (slow, 60% $VO_2\text{max}$). The long iE had a total duration of 13 min, where 3 series of 3 min of fast speed and 2 series of 2 min of slow speed were interspersed (fast-slow-fast-slow-fast). The short iE had a total duration of 5 min, where 2 series of 2 min of fast speed were separated by 1 min of slow speed (fast-slow-fast). To encourage participants' effort, an adult also accompanied them during the exercise and they continued collecting memory game cards during the iE execution as they did in the 20mSRT. Before starting the iE, both groups completed a warm-up protocol where they were familiarized with the test procedure and the two exercise intensities. During this warm-up, participants run for 2 min at slow speed and 1 min at fast speed. Between the warm-up and the iE start a 5 min rest was granted. Participants' hearth rate was captured following the same procedure described for the 20mSRT.

6.3.4 Data reduction

Custom MATLAB R2014b programs (The MathWorks, Inc.) were used to reduce the Cartesian positions of the joystick movement. Data were low-pass filtered using an eight-order dual-pass Butterworth filter with a cut-off frequency of 12Hz. Accepted trials fulfilled the following conditions: startup position found within a 20% of the target radius (distance from center to target), and total travelled distance from the screen center to the end of the movement equal to or higher than 90% of the target radius. For the accepted trials, the nearest point to an outward movement equal to a 10% of the target radius distance was defined as the movement onset. Movement

offset was defined as the point where the speed of the movement decreased to a 10% of its maximum value. The AD set was divided in epochs of 8 trials for further analyses.

6.3.5 Variables

Movement descriptive characteristics were represented by calculation of the movement time (MT, ms), the travel distance (TD, cm), and the reaction time (RT, ms). MT and TD were defined as the time and the displacement between the movement onset and offset. RT was defined as the time window from the target appearance to the movement onset. Two variables representative of the output error were computed: the initial deviation error (IDE, deg) and the root mean squared error (RMSE, cm). IDE was calculated as the angular difference between two linear vectors, representing the ideal movement trajectory and the real initial trajectory. The ideal trajectory of the movement was defined as the linear vector from the center of the test screen to the target. The real initial trajectory was defined as the linear vector from the center of the test screen to the cursor position 80 ms after the movement onset. IDE stands for the output error before visual feedback was available to correct the cursor trajectory. Therefore, IDE was thought to be related with the motor planning of the motor skill and consequently the state of the internal model of the skill (Contreras-Vidal et al., 2005). RMSE was calculated to represent the straightness of the entire movement trajectory, comprising the possibility of performing perceptual feedback guided online corrections. RMSE was calculated comparing the real performed trajectory with the ideal trajectory of the movement from movement onset to movement offset. RMSE was calculated using the following equation:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2] \frac{1}{N}}$$

where (x_1, y_1) and (x_2, y_2) are the coordinate points of the real trajectory and the ideal trajectory, respectively, and N is the number of points in the path.

Considering the large inter-subject variability usually presented by children, computed adaptation and retention variables were normalized by the participant's baseline mean values.

As seen in other studies (Krakauer et al., 2005) error variables during AD set followed a decay flow that resulted to be best fitted by a double exponential function:

$$y = a * e^{b*x} - c * e^{d*x}$$

where y is the error, x is the epoch number and a, b, c and d are parameters. Therefore, the error decay presented an initial rapid reduction followed by a slower decay of the error. The initial rate of learning (RL) is a measure of the initial rapid error reduction. Individual RL for both error variables IDE (RL_IDE) and RMSE (RL_RMSE) were computed as the first derivative of the first half of the function and evaluated at epoch 1, similarly as described in Coats (2014).

6.3.6 Data analysis

Normality distribution was assumed for all variables via exploration with the Shapiro-Wilk's normality test. When normality assumption failed, variable transformation or non-parametric alternative tests were adequately conducted. Age and estimated VO₂max measures were explored through one-way analysis of variance (ANOVA) to

evaluate group similarities. We also compared the mean BA value for each variable (MT, TD, RT, IDE, and RMSE) with ANOVAs in order to ensure that the baseline performance was similar across the three groups. The possible effect of including participants from two different Sites was explored through a Student's t Test or the Mann-Whitney U Test for non-normal data, including the analysis of the age and estimated $VO_2\text{max}$, and the rVMA BA variables. In addition, to control for any possible Site effects on the AD or RT sets we added Site as a covariable in the following analyses. For the first study hypothesis, where the effect of the iE bout on the AD of the rVMA task was examined, mean values of every variable calculated for the AD set (MT, TD, RT, IDE, RMSE, RL_IDE, and RL_RMSE) were compared using one-way ANCOVA. To analyze the second and third hypothesis, related to the effect of exercise on motor retention and the modulation effect of the exercise length on the retentions of the rVMA task, mean values of each variable (MT, TD, RT, IDE, and RMSE) were calculated. Differences among groups for the retention sets were assessed through two-way (Group x Set) repeated measures ANCOVAs. Greenhouse-Geisser sphericity-corrected values were reported when appropriate. Bonferroni *post hoc* analyses were performed when significant differences were found. Based on the hypothesis and prior results, planned comparison analyses were employed in the event of non-significant effect to assess critical comparisons of interest. The effect size of the different tests was calculated according to Cohen (1988): d for t Test (0.2 small, 0.5 medium, 0.8 large effect), r for Mann-Whitney U Test (0.1 small, 0.3 medium, 0.5 large effect) and η^2_p for ANOVAs and ANCOVAs (0.01 small, 0.06 medium, 0.14 large effect). Statistical significance was set at $p < 0.05$ for all comparisons.

6.4 Results

Participant characteristics (Age and estimated VO₂max) were checked via ANOVAs in order to observe differences among groups caused by the participant's distribution. No Age differences were observed among groups ($F_{(2, 68)} = 0.802$; $p = 0.453$; $\eta^2 p = 0.023$) but a group effect was found when VO₂max values were analyzed ($F_{(2, 68)} = 4.061$; $p = 0.022$; $\eta^2 p = 0.107$). Participants in SHORT group presented lower VO₂max values in comparison to LONG ($p = 0.039$, $d = 0.936$) and CON ($p = 0.043$, $d = 0.754$) groups. In addition to the participant characteristics, we also checked the groups' distribution analyzing the baseline performance of the rVMA task using ANOVAs (see Tabla 6.2 for means and SD). While similar values were exhibited for the TD ($F_{(2, 68)} = 0.884$; $p = 0.418$; $\eta^2 p = 0.025$) and RT ($F_{(2, 68)} = 0.859$; $p = 0.428$; $\eta^2 p = 0.025$) variables, MT presented a group effect ($F_{(2, 68)} = 3.590$; $p = 0.033$; $\eta^2 p = 0.095$). Differences between groups did not reach statistical significance in the *post-hoc* analysis, although participants in the SHORT group showed the lowest mean value for this variable. When analyzing the error variables during the baseline set, IDE showed to be similar across the three groups ($F_{(2, 68)} = 0.642$; $p = 0.530$; $\eta^2 p = 0.019$). However, RMSE presented a group effect ($F_{(2, 68)} = 3.450$; $p = 0.037$; $\eta^2 p = 0.092$), where the SHORT group exhibited higher RMSE values in comparison to CON group ($p = 0.045$, $d = 0.651$). Because the SHORT group was composed by participants only from Site 2 of the study, group differences in VO₂max and rVMA at baseline (MT and RMSE) could be confounded by a Site effect.

The analysis of the possible Site effect on the participants characteristics showed that participants from Site 1 (BCN) presented higher VO₂max ($t_{(69)} = 5.026$; $p = 0.000$; $d =$

1.442), compared to the participants in Site 2 (LA). No age differences were found between Sites ($U = 441$; $p = 0.289$; $r = 0.126$). When the Site effect was explored for the rVMA BA variables, we found significant statistical differences between Sites for the MT ($t_{(69)} = 9.095$; $p = 0.000$; $d = 2.164$), TD ($t_{(69)} = 6.496$; $p = 0.000$; $d = 1.786$), RT ($t_{(69)} = 2.979$; $p = 0.000$; $d = 0.805$), and RMSE ($U = 111$; $p = 0.000$; $r = 0.619$) variables, indicating that participants from Site 1 executed the task with longer MT, and shorter TD and RT. Moreover, Site 1 participants presented lower RMSE values, which could possibly be related to the observed lower TD. Despite that the instructions to participants were the same in both Sites, the differences found could possibly be produced by a different movement approach by the participants, probably influenced by different semantical meaning of the instructions. When the expression “as fast as possible” is used, one can interpret being as fast as possible to start the movement or to execute the entire movement. Apparently, Site 1 prioritized movement initiation while Site 2 focused on the movement as a whole. However, IDE which does not directly depend on the movement approach but on the planning of the movement, showed no differences between Sites ($t_{(69)} = -0.342$; $p = 0.733$; $d = 0.160$).

Tabla 6.2. Mean and SD performance values on the rotational visuomotor adaptation task (rVMA) for each group, site and set

	LONG			SHORT	CON		
	Site 1	Site 2	Site 1 + 2	Site 2	Site 1	Site 2	Site 1 + 2
Baseline							
MT (ms)	196.15 ± 28.64	150.36 ± 23.47	167.32 ± 33.62	145.72 ± 14.71	195.72 ± 26.41	143.61 ± 13.70	166.53 ± 33.00
TD (cm)	6.85 ± 0.32	7.57 ± 0.45	7.30 ± 0.53	7.35 ± 0.46	6.67 ± 0.36	7.53 ± 0.46	7.15 ± 0.59
RT (ms)	404.15 ± 36.97	439.85 ± 37.90	426.63 ± 40.81	433.24 ± 46.66	419.14 ± 32.54	459.93 ± 37.16	441.98 ± 40.20
IDE (deg)	12.44 ± 6.08	10.40 ± 2.36	11.15 ± 4.15	11.76 ± 6.23	10.67 ± 3.26	9.96 ± 2.10	10.27 ± 2.63
RMSE (cm)	0.90 ± 0.20	1.06 ± 0.16	1.00 ± 0.19	1.15 ± 0.35	0.83 ± 0.06	1.09 ± 0.16	0.97 ± 0.18
Adaptation							
MT (ms)	199.04 ± 26.7	145.96 ± 20.36	165.62 ± 34.41	146.00 ± 18.38	214.39 ± 38.35	151.75 ± 17.52	179.31 ± 42.26
TD (cm)	7.00 ± 0.31	7.75 ± 0.38	7.74 ± 0.51	7.52 ± 0.45	6.83 ± 0.27	7.79 ± 0.18	7.37 ± 0.53
RT (ms)	408.23 ± 46.82	455.30 ± 38.84	437.87 ± 47.16	451.73 ± 47.45	423.11 ± 45.03	456.94 ± 32.60	442.06 ± 41.41
IDE (deg)	28.67 ± 6.01	30.44 ± 8.74	29.78 ± 7.77	30.08 ± 7.62	32.38 ± 7.94	32.81 ± 10.18	32.62 ± 9.08
RL_IDE	-4.09 ± 4.65	-5.16 ± 3.29	-4.77 ± 3.77	-6.11 ± 6.29	-6.10 ± 5.74	-4.29 ± 2.19	-5.10 ± 4.12
RMSE (cm)	2.00 ± 0.34	2.72 ± 0.68	2.45 ± 0.67	2.59 ± 0.49	2.20 ± 0.58	2.87 ± 0.81	2.58 ± 0.78
RL_RMSE	-0.49 ± 0.28	-0.06 ± 0.05	-0.07 ± 0.05	-0.06 ± 0.03	-0.58 ± 0.85	-0.09 ± 0.07	-0.09 ± 0.10
Retention 1h							
MT (ms)	204.79 ± 30.48	142.57 ± 16.32	165.61 ± 37.72	133.75 ± 13.61	193.51 ± 31.14	140.47 ± 19.54	163.81 ± 36.51
TD (cm)	7.06 ± 0.34	7.91 ± 0.32	7.60 ± 0.53	7.91 ± 0.42	7.00 ± 0.31	7.90 ± 0.29	7.50 ± 0.54
RT (ms)	418.07 ± 45.40	448.73 ± 43.72	437.38 ± 46.01	443.98 ± 53.11	432.09 ± 41.01	451.63 ± 35.82	443.03 ± 38.65
IDE (deg)	17.43 ± 3.40	18.73 ± 6.14	18.25 ± 5.26	20.16 ± 7.01	24.04 ± 10.14	22.35 ± 7.00	23.09 ± 8.37
RMSE (cm)	1.32 ± 0.18	1.85 ± 0.48	1.65 ± 0.47	1.97 ± 0.53	1.71 ± 0.54	2.07 ± 0.55	1.91 ± 0.56
Retention 24h							
MT (ms)	211.88 ± 33.80	143.97 ± 17.56	169.12 ± 41.25	137.37 ± 16.46	194.72 ± 31.35	143.77 ± 22.78	166.19 ± 36.84
TD (cm)	7.16 ± 0.35	7.82 ± 0.27	7.58 ± 0.44	7.89 ± 0.37	7.27 ± 0.45	7.75 ± 0.29	7.54 ± 0.44
RT (ms)	414.44 ± 48.04	459.42 ± 43.60	442.76 ± 49.58	444.00 ± 51.22	427.44 ± 30.95	450.71 ± 41.64	440.47 ± 38.44
IDE (deg)	17.02 ± 4.28	18.94 ± 5.40	18.23 ± 5.02	18.76 ± 5.71	23.49 ± 7.42	20.85 ± 4.28	22.01 ± 5.89
RMSE (cm)	1.33 ± 0.25	1.82 ± 0.38	1.64 ± 0.41	1.86 ± 0.44	1.76 ± 0.45	1.97 ± 0.37	1.88 ± 0.41
Retention 7 days							
MT (ms)	203.87 ± 31.36	144.63 ± 20.02	166.57 ± 37.91	133.67 ± 16.12	195.37 ± 33.96	137.12 ± 11.90	162.75 ± 37.79
TD (cm)	7.30 ± 0.31	7.81 ± 0.39	7.62 ± 0.44	7.79 ± 0.32	7.27 ± 0.34	7.77 ± 0.35	7.55 ± 0.42
RT (ms)	406.93 ± 51.39	445.37 ± 44.39	431.14 ± 49.85	431.25 ± 46.36	422.40 ± 42.6	443.42 ± 30.53	434.17 ± 37.07
IDE (deg)	17.72 ± 4.41	17.20 ± 5.59	17.39 ± 5.10	19.17 ± 5.07	21.32 ± 7.90	20.97 ± 6.20	21.12 ± 6.84
RMSE (cm)	1.30 ± 0.20	1.66 ± 0.37	1.53 ± 0.36	1.83 ± 0.39	1.57 ± 0.38	1.95 ± 0.43	1.78 ± 0.45

Abbreviations: LONG = Long exercise bout group; SHORT = short exercise group; CON = no exercise group; MT = movement time; TD = travel distance; RT = reaction time; IDE = initial directional error; RMSE = root mean squared error; RL = rate of learning.

The observed differences in MT and RMSE among groups and the observed Site effect on the estimated measure of VO2max and the BA parameters, add strength to the need to normalize rVMA variables by the baseline mean values of each variable in the following sets (AD, RT1h, RT24h, and RT7d). Moreover, the observed Site effect requires the use of Site as covariable in the AD and RT analyses.

To examine the possible exercise effect on the adaptation of the rVMA task, we explored the effect of the SHORT, LONG or CON interventions on the average performance of the adaptation set as well as the initial rate of learning (RL) of the calculated error variables (IDE and RMSE). The ANCOVA revealed that there were no differences among groups in relation to

the descriptive variables of the movement: MT ($F_{(2, 68)} = 2.741$; $p = 0.072$; $\eta^2 p = 0.076$), TD ($F_{(2, 68)} = 0.302$; $p = 0.740$; $\eta^2 p = 0.009$), and RT ($F_{(2, 68)} = 2.733$; $p = 0.072$; $\eta^2 p = 0.075$). Similarly, no group differences were found for the error variables of the rVMA: IDE ($F_{(2, 68)} = 2.565$; $p = 0.084$; $\eta^2 p = 0.071$) and RMSE ($F_{(2, 68)} = 2.070$; $p = 0.134$; $\eta^2 p = 0.058$) were similar among groups. In addition, we did not observe differences when analyzing the effect of exercise on the rate of learning of both error variables, RL_IDE ($F_{(2, 57)} = 0.384$; $p = 0.683$; $\eta^2 p = 0.015$) and RL_RMSE ($F_{(2, 57)} = 0.736$; $p = 0.484$; $\eta^2 p = 0.026$) (Figura 6.2). The covariable Site was found to be significant only in the RMSE analysis ($F_{(2, 68)} = 9.025$; $p = 0.004$; $\eta^2 p = 0.119$).

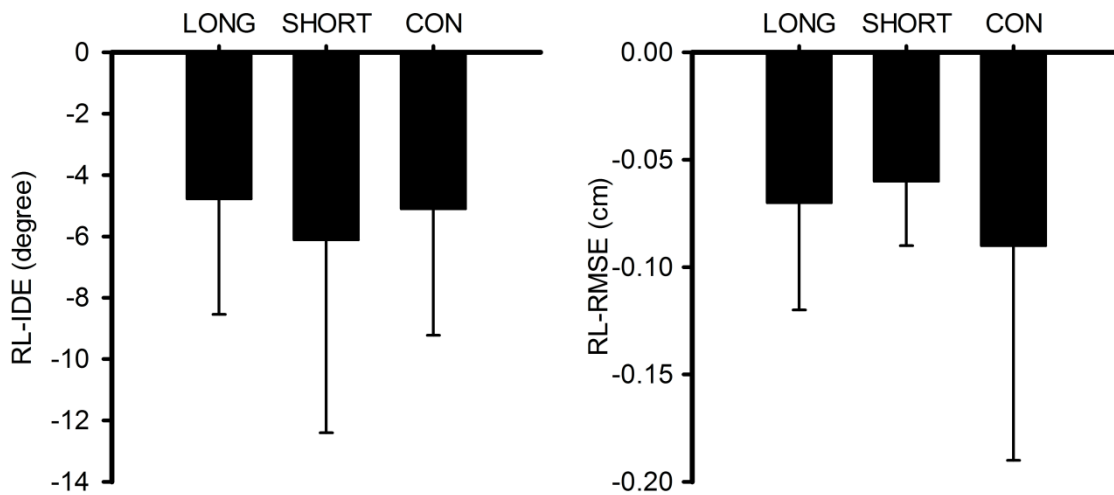


Figure 6.2. Group average rate of learning during the adaptation set. Mean and standard deviations of the rate of learning during the adaptation set of the rotational visuomotor adaptation task (rVMA). The rate of learning (RL) of the initial deviation error (IDE) and root mean square error (RMSE) variables of each group were computed and compared. Abbreviations: LONG, long exercise bout before the rVMA task; SHORT, short exercise bout before the rVMA task; CON, no exercise before the rVMA task.

The effect of the different exercise interventions on the retentions of the rVMA task were analyzed using repeated measure ANCOVAs. No group effect of the exercise interventions was observed in any of the movement descriptive parameters: MT ($F_{(2, 68)} = 0.548$; $p = 0.580$; $\eta^2 p = 0.016$), TD ($F_{(2, 68)} = 2.663$; $p = 0.077$; $\eta^2 p = 0.074$), and RT ($F_{(2, 68)} = 1.440$; $p = 0.244$; $\eta^2 p = 0.041$). However, significant group effects were found for the IDE ($F_{(2, 68)} = 7.102$; $p = 0.002$; $\eta^2 p = 0.175$) and the RMSE ($F_{(2, 68)} = 4.948$; $p = 0.010$; $\eta^2 p = 0.129$) variables. *Post-hoc* analysis indicated that both exercise groups had lower IDE values in comparison to CON group (LONG: $p = 0.002$; $d = 0.868$), SHORT: $p = 0.022$; $d = 0.708$). Furthermore, LONG group also showed lower RMSE values compared to CON group ($p = 0.009$; $d = 0.704$). Despite not observing a significant interaction effect, planned pairwise comparisons were carried for the Group x Set interaction of both error variables. Pairwise comparison analyses revealed that LONG group had a better performance in all retention sets: RT1h ($p = 0.004$; $d = 0.858$), RT24h ($p = 0.008$; $d =$

0.870), and RT7d ($p = 0.009$; $d = 0.873$) compared to the CON group for the IDE variable (Figura 6.3). SHORT group also demonstrated a significantly better RT24h ($p = 0.015$; $d = 0.859$) than CON group. Similarly, LONG group presented significantly greater performance for the RMSE in comparison to CON group during all retention sets: RT1 ($p = 0.049$; $d = 0.621$), RT24h ($p = 0.026$; $d = 0.697$), and the RT7d ($p = 0.008$; $d = 0.838$). No differences were seen between exercise groups across retention sets for any of the computed variables. The covariable Site was not significant in any of the rVMA retention analyses.

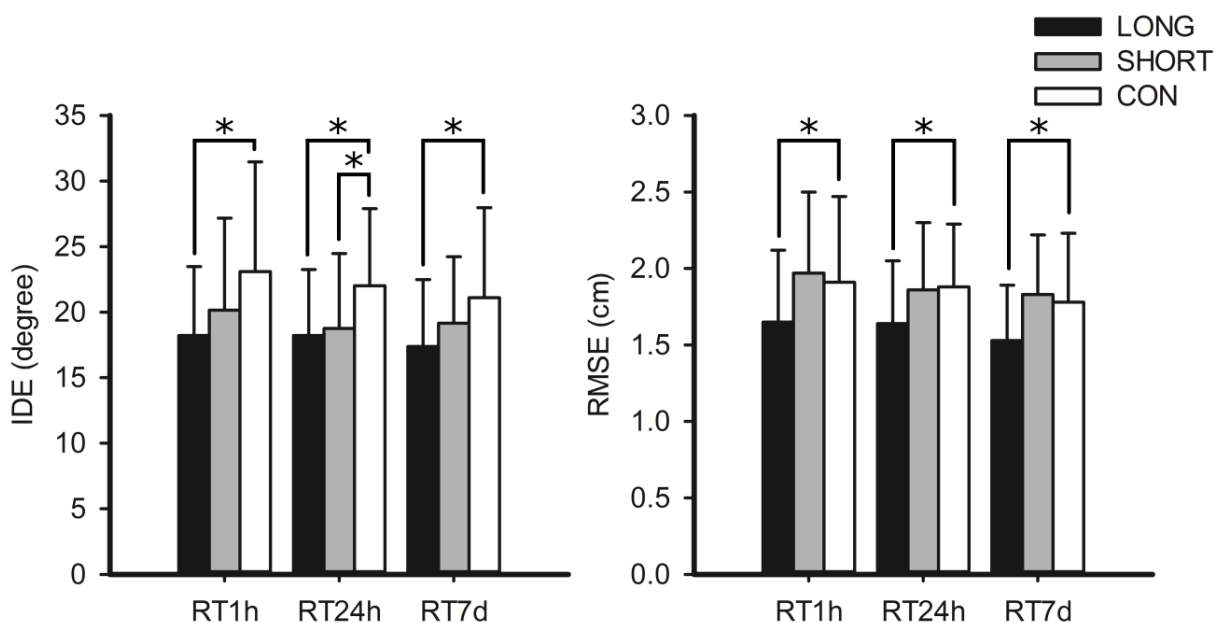


Figure 6.3. Group average error performance during retention sets of the rotational visuomotor task (rVMA). Comparison of group's performance during the short (RT1h), mid (RT24h) and long-term (RT7d) retention sets. Normalized error values for the initial deviation error (IDE) and root mean square error (RMSE) variables were compared. Significant differences were represented by (*). Abbreviations: LONG, long exercise bout before the rVMA task; SHORT, short exercise bout before the rVMA task; CON, no exercise before the rVMA task.

6.5 Discussion

The main focus of this study was to observe the effect of two exercise protocol durations (5 minutes, short bout, and 13 minutes, long bout) on the adaptation and consolidation of a rVMA task. Despite that long intense exercise interventions have already been observed to enhance motor learning in children, as presented in the study 2 of the thesis, finding evidence of benefits from shorter exercise interventions would open new possible exercise applications to facilitate motor learning in children.

Regarding motor adaptation, previous research has observed that while moderate intensity aerobic exercise would enhance adaptation, higher exercise intensities would produce a null effect, possibly because of inducement of fatigue (Roig et al., 2012) or excessive arousal (McMorris & Hale, 2012). In the studies 1 and 2 presented in this thesis, we already observed a null effect of the long exercise bout on adult and children's motor adaptation. Based on these evidences, we hypothesized that although short, an intense exercise bout would still not affect motor adaptation because the same limiting factors may apply. Results showed that performance of the rVMA task during the adaptation set was similar among the three groups (LONG, SHORT and CON) as we hypothesized. Exercise showed no effect on the movement descriptive parameters (MT, TD, and RT), the mean error variables during adaptation (IDE and RMSE) or the rate of learning (RL-IDE and RL-RMSE). Therefore, it seems that the limited exercise effect on motor adaptation is rather robust when exercise intensity is high no matter if the duration is longer or shorter.

One of the possible causes of this exercise null effect on motor adaptation is the possible fatigue induced by the exercise bout intensity and the short delay time

between exercise and the rVMA AD (4 min). Moreover, as stated previously (McMorris & Hale, 2012) moderate exercise may possibly facilitate motor adaptation by a moderate increase in the catecholamine secretion, while intense exercise would induce an excessive catecholamine concentration that could even be detrimental for cognitive performance and hence motor adaptation. In fact, moderate exercise has been shown to improve motor adaptation but not motor consolidation (Snow et al., 2016; Statton et al., 2015; Thomas, Johnsen, et al., 2016), whereas intense exercise has been observed to improve motor consolidation but not motor adaptation (Roig et al., 2012). The results presented in studies 1 and 2 of this thesis are in agreement with this previous evidence. We propose that the underlying mechanisms related to facilitation of each learning process (i.e. adaptation or consolidation) might be different, possibly presenting different responses to exercise-induced increases in neural substrates and different time-dependent dynamics. However, further research may be necessary to further speculate on this topic. Future studies should examine the effect of different exercise intensities (high vs moderate) on motor adaptation and consolidation, and analysis of the underlying mechanisms regarding each exercise intensity in both populations, adult and children are necessary.

Regarding motor retention and based on previous research where relatively intense and long exercise bouts enhanced motor memory consolidation in adults (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012; Thomas, Johnsen, et al., 2016) and children (Lundbye-Jensen et al., 2017), we hypothesized that LONG group would enhance motor retention. Furthermore, based on the evidence that intense exercise bouts shorter than 10 min have facilitated declarative learning in adult (Winter et al., 2007) and children (Etnier et al., 2014), we hypothesized that although LONG group would present a greater

effect, SHORT group would also improve motor consolidation. Similarly to what we hypothesized, both exercise interventions enhanced motor memory consolidation whether the duration of the exercise was long or short. Movement approach defined by the descriptive variables of the movement (MT, TD and RT) was similar among groups and across retentions. However, the movement planning of the motor skill (IDE) improved during the retention sets presumably as result of the exercise intervention. This exercise based improvement cannot be explained by a Site effect since differences were not found between Sites for the IDE variable. While SHORT group presented improvements during the 24h retention set, LONG group showed a greater and more sustained (all retention sets) improvement of the motor planning. In addition, LONG group also presented an improvement in the movement straightness at 24h and 7 days after adaptation. Therefore, although longer exercise durations may provide greater enhancements, to our knowledge this is the first evidence of a facilitation of motor memory consolidation after a bout of exercise as short as 5 min duration.

Previous research in adult population has proposed that the exercise benefits on memory consolidation may be produced by a stimulation of the learning related neuroplasticity mechanisms. Neurotrophins like Brain Derived Neurotrophic Factor (BDNF) along with catecholamines (epinephrine, norepinephrine and dopamine) are some of the biomarkers that have captured more attention by the scientific community in relation to enhancement of synaptic plasticity (Taubert et al., 2015). Physical exercise, especially intense aerobic exercise, has been related to increases in peripheral blood concentrations of these neurochemical compounds (Winter et al., 2007). Furthermore, these exercise-related increases in neurochemical compounds

have been related to improvements in declarative (Segal et al., 2012; Winter et al., 2007) and motor memory consolidation (Mang et al., 2014; Skriver et al., 2014). In addition to these neurochemical compounds, increases in blood lactate concentration have also been seen to positively correlate with improvements in motor consolidation (Skriver et al., 2014). Despite that a causal relation between lactate and synaptic plasticity may be difficult to explain, it has been proposed that elevations of blood lactate concentration could be acting as an intermediate or modulator of the synaptic plasticity mechanisms, possibly involved in growth-factor signaling and brain energetics (Skriver et al., 2014; Taubert et al., 2015). However, this relation has to be interpreted with caution because of the difficulties to measure central concentration levels of these biomarkers in humans, which limits the possibility to establish a causal link between neurochemicals concentration and the exercise-induced memory consolidation enhancements. Moreover, despite that increases in catecholamine concentration have also been observed in response to an exercise intervention in healthy children (Wigal et al., 2003), there is no evidence of the effect of exercise on their neurotrophin levels or the relation between these neurochemicals and children's motor memory consolidation. Therefore, further research is required to explore the potential mechanisms underlying the existing beneficial relation between exercise and motor consolidation, especially in children.

Taking into consideration these evidences, this study presents new insights about the influence of the exercise duration on the consolidation of procedural memory in children. The different responses to exercise presented by the exercise groups could be explained by a greater raise of the arousal and its' underlying mechanisms in response to a longer exercise exertion. It is expected that longer exercise exertions of

similar conditions of high intensity might result in greater lactate productions (Jacobs, 1986) and, possibly, in a greater facilitation of the learning-related mechanisms (Skriver et al., 2014). As presented by Engel et al. (2015), and despite that the amount of lactate production in children is lower compared to adults at equal exercise intensities, intense exercise would exponentially increase lactate production in both populations. Consequently, we think that exercise duration could modulate the exercise-induced benefits on motor consolidation through lactate and neurochemical production, increasing its production when exercise duration is longer. Then, the behavioral results of the present study, where LONG group obtained greater consolidation improvements compared to SHORT group may indicate that, at equal intensity, longer exercise bouts would produce greater stimulation of the plasticity related mechanisms and thus more sustained motor consolidation. Overall, the results in the present study suggest that exercise can enhance children's motor learning. Moreover, even with an exercise bout as short as 5 min it is possible to stimulate children's procedural memory consolidation at short term whenever the intensity of the exercise is high. Previous studies have demonstrated the benefits in children attention when performing short exercise sessions during school hours (Ma et al., 2014; Mahar et al., 2006). Therefore, we think that short and intense exercise bouts could be a suitable mean to improve children motor learning in school or sport environments, where children engage in the learning of many new motor skills.

6.6 Conclusions

Consolidation of the rVMA task was enhanced through acute exercise of two different durations when compared to a control group who rested instead of exercising. Even when the exercise duration was only 5 minutes, short term motor consolidation was improved. However, greater exercise duration up to 13 minutes would be advisable to increase the exercise effects on motor consolidation. As expected, and although enhancing motor consolidation, intense exercise bouts could not improve the adaptation rate of the motor task. It seems that a combination of high arousal and fatigue could hinder the possible effect of exercise on motor adaptation, even when the exercise duration is low. The positive effects of short acute exercise on children's motor learning support the trend of using short bouts of exercise in school or sport environments to boost children's motor learning. We also emphasize the importance of studying the underlying mechanisms of exercise-induced improvements in memory consolidation, especially in children where information on this topic is scarce.

Capítulo 7: Efectos del ejercicio sobre la adaptación y consolidación de la tarea rVMA: la importancia de la edad



7.1 Introducción

En el presente capítulo se desarrollará un análisis comparativo de los resultados del estudio 1 (Capítulo 4) y el estudio 2 (Capítulo 5) de la tesis doctoral. En ambos capítulos se estudió el posible efecto de una intervención aguda de ejercicio intenso (iE) sobre la adaptación y la consolidación motora de la tarea de adaptación visuomotora rotacional (rVMA). Además, en ambos estudios también se analizó el posible efecto del orden de presentación de la tarea rVMA y el iE. Tanto en el caso de los adultos (estudio 1) como en el de los niños (estudio 2), no se observó un efecto del ejercicio sobre la adaptación de la tarea motora, ya que los participantes presentaron un rendimiento y una ratio de aprendizaje similar tanto si habían realizado ejercicio antes de ejecutar la adaptación en la tarea rVMA como si no. Por el contrario, sí que se observaron mejoras en el proceso de consolidación del aprendizaje motor. En el caso de los adultos estas mejoras fueron observadas solo a corto plazo (set de retención al cabo de 1 h, RT1). En el caso de los niños, los efectos del ejercicio no se limitaron a la retención a corto plazo, sino que también se extendieron a medio y largo plazo cuando el ejercicio se realizó antes de la tarea (set de retención a las 24 h, RT24, y 7 días, RT7d). Por último, si bien en el caso de los adultos no se apreciaron diferencias en cuanto al efecto del orden de presentación del iE y la adaptación en la tarea rVMA, sí que se observó un efecto en el caso de los niños, quienes mostraron mejores resultados cuando el ejercicio se presentó antes de la adaptación motora.

Dados estos resultados, y tal y como se propuso en el caso del estudio 2 de la tesis, se considera que podría existir un efecto modulador de la edad en relación a los beneficios del ejercicio sobre la consolidación motora. Con la intención de comprobar

este posible efecto de la edad sobre los beneficios del ejercicio en el aprendizaje motor, se realizó el presente análisis comparativo entre los estudios 1 y 2 de la tesis doctoral. El estudio comparativo no se limitó a los resultados obtenidos en relación a la consolidación del aprendizaje, sino que también se realizó la comparación de las características de los participantes, del rendimiento basal y del proceso de adaptación de la habilidad motora.

De este modo, y junto a las bases presentadas en el capítulo 1, se hipotetizó que: (1) los adultos presentarían un mayor rendimiento basal que los niños en la tarea rVMA, (2) los adultos presentarían un mayor rendimiento durante la adaptación de la tarea rVMA que los niños, (3) el iE facilitaría la consolidación motora de los niños en mayor medida que en los adultos, y (4) la realización de iE antes de la adaptación de la tarea rVMA sería la estrategia del orden de presentación que mayores beneficios daría a los niños en comparación con los adultos.

7.2 Análisis estadístico

Se asumió la normalidad de la distribución de los datos mediante el Test de Shapiro-Wilk. Cuando los datos no se ajustaron a la distribución normal se aplicaron transformaciones o se utilizaron test no-paramétricos alternativos que se adecuaron a la tipología de análisis. Las características de los participantes (edad, años; VO_2 max estimado, ml/kg/min) fueron comparadas mediante el Test U de Mann-Whitney. Para la primera hipótesis del análisis, se compararon los valores promedio de los parámetros calculados para el set basal (BA) de la tarea rVMA (MT, tiempo de movimiento; TD, distancia recorrida; RT, tiempo de reacción; IDE, error direccional inicial; y RMSE, raíz del promedio de los errores al cuadrado) a partir del análisis de la

varianza (ANOVAs) de dos vías (Grupo x Edad). De forma similar, para la segunda hipótesis las diferencias durante el set de adaptación (AD) fueron analizadas utilizando ANOVAs de dos vías (Cohorte x Edad) para la ratio de aprendizaje (RL-IDE y RL RMSE) y los valores promedio del resto de los parámetros calculados de la tarea rVMA (MT, TD, RT, IDE y RMSE). En este caso, la muestra de cada estudio se dividió en dos Cohortes en función de si habían realizado o no ejercicio antes de ejecutar el set AD de la tarea rVMA: Cohorte de ejercicio (grupo EX-rVMA) y Cohorte de no-ejercicio (que incluye los grupos rVMA-EX y CON). Esta división fue realizada únicamente con propósitos de análisis de los datos. Por último, con el fin de comprobar la tercera y cuarta hipótesis del presente análisis, se compararon los parámetros de la tarea rVMA (MT, TD, RT, IDE y RMSE) para los sets de retención (RT1, RT24 y RT7d) utilizando ANOVAs de medidas repetidas de tres vías (Set x Grupo x Edad). Los valores de la corrección de esfericidad de Greenhouse-Geisser se reportaron cuando fue necesario. En caso de hallar diferencias significativas para las ANOVAs se realizaron análisis *post-hoc* aplicando la corrección de Bonferroni. Basándonos en las hipótesis formuladas y en los resultados previos de los estudios 1 y 2 de la tesis doctoral, se realizaron comparaciones planificadas en caso de no encontrar un efecto significativo para las interacciones de interés. El tamaño del efecto se calculó de acuerdo con Cohen (1988): d para las comparaciones por pares (0.2 efecto pequeño, 0.5 medio, 0.8 grande), r para el Test U de Mann-Whitney (0.1 efecto pequeño, 0.3 medio, 0.5 grande) y η^2p para las ANOVAs (0.01 efecto pequeño, 0.06 medio, 0.14 grande). El nivel de significación estadística fue fijado en $p < 0.05$ para todas las comparaciones.

7.3 Resultados

7.3.1 Características de los participantes

Las características de los participantes (edad y VO₂max estimado) fueron comparadas utilizando el Test no paramétrico U de Mann-Whitney. Los participantes adultos mostraron una edad significativamente superior a la de los niños ($U = 0$; $p = 0.001$; $r = 0.860$). Al mismo tiempo, en comparación a los niños, los participantes adultos también mostraron un VO₂max estimado mayor ($U = 254$; $p = 0.002$; $r = 0.400$).

7.3.2 Rendimiento basal de adultos y niños en la tarea rVMA

En cuanto a los parámetros analizados para la prueba de aprendizaje rVMA, se comparó el rendimiento basal de ambos grupos de edad a partir del análisis de la varianza (ANOVA) (ver los resultados en la Tabla 7.1). Se observó un efecto principal de la edad en las variables descriptivas del movimiento: MT, TD y RT. En comparación a los niños, los adultos mostraron valores inferiores tanto para el MT como para el TD y el RT. Así mismo, los participantes adultos manifestaron una magnitud menor en cuanto a las variables de error: IDE y RMSE. Estas diferencias encontradas en el rendimiento basal de la tarea rVMA entre los dos grupos de edad sumaron importancia a la necesidad de normalizar los datos de los sets de adaptación y retención a partir de los respectivos valores basales de cada variable para poder comparar ambos grupos de edad adecuadamente. Es importante resaltar que no se hallaron diferencias significativas en ninguna de las variables entre los grupos o en la interacción grupo y edad.

Tabla 7.1. Resultados del análisis del set BA de la tarea rVMA

Variable	Efecto principal o interacción	df	F	p	η^2p	Potencia	Post-hoc
MT	EDAD	56,5	40.103	0.000	0.417	1.000	ADULTOS < NIÑOS
	GRUPO	56,5	0.028	0.973	0.001	0.054	
	EDAD x GRUPO	56,5	0.182	0.834	0.006	0.077	
TD	EDAD	56,5	54.442	0.000	0.493	1.000	ADULTOS < NIÑOS
	GRUPO	56,5	0.682	0.510	0.024	0.159	
	EDAD x GRUPO	56,5	1.604	0.210	0.054	0.326	
RT	EDAD	56,5	65.781	0.000	0.540	1.000	ADULTOS < NIÑOS
	GRUPO	56,5	2.933	0.061	0.095	0.550	
	EDAD x GRUPO	56,5	0.836	0.439	0.029	0.186	
IDE	EDAD	56,5	51.900	0.000	0.481	1.000	ADULTOS < NIÑOS
	GRUPO	56,5	0.604	0.550	0.021	0.146	
	EDAD x GRUPO	56,5	0.416	0.662	0.015	0.114	
RMSE	EDAD	56,5	10.219	0.002	0.154	0.881	ADULTOS < NIÑOS
	GRUPO	56,5	1.288	0.284	0.044	0.268	
	EDAD x GRUPO	56,5	0.909	0.409	0.031	0.199	

Las diferencias significativas han sido resaltadas en negrita y sombreadas

7.3.3 Comparación del efecto del ejercicio sobre la adaptación motora entre adultos y niños

Para el análisis del efecto del ejercicio sobre la adaptación motora, se dividieron los participantes de cada estudio en dos cohortes en función de si habían realizado ejercicio o no antes de participar en la adaptación de la tarea rVMA, cohorte de ejercicio (grupo EX-rVMA) y cohorte de no ejercicio (grupos rVMA-EX y CON), y se compararon los resultados de ambos estudios. Así mismo, recordamos que las variables fueron normalizadas por sus valores en rendimiento basal. La comparación del comportamiento de las Cohortes y los grupos de Edad durante el set de adaptación se realizó a partir de ANOVAs (ver los resultados en la Tabla 7.2). Durante la adaptación motora, se observó un efecto principal de la edad sobre las variables de error donde ambas, IDE y RMSE, presentaron unos valores menores en los adultos que en los niños. De forma similar, también se observó un efecto principal de la Edad sobre la ratio de aprendizaje de la variable IDE (RL-IDE). En cuanto a la interacción de la Edad y la Cohorte, no se encontró un efecto para ninguna de las variables estudiadas. Aun así, en el caso de las variables IDE, RMSE, RL-IDE y RL-RMSE, se realizaron comparaciones planificadas sobre esta interacción (Edad x Cohorte) donde se observó cómo los adultos presentaban un nivel de error inferior y una mayor ratio de aprendizaje que los niños, tanto en el caso de la cohorte de ejercicio (IDE: $p = 0.040$, $d = 0.975$; RMSE: $p = 0.050$, $d = 1.351$; RL-IDE: $p = 0.012$, $d = 1.391$; RL-RMSE: $p = 0.072$, $d = 1.051$) como en la de no ejercicio (IDE: $p = 0.001$, $d = 1.623$; RMSE: $p = 0.001$, $d = 1.195$; RL-IDE: $p = 0.002$, $d = 1.029$; RL-RMSE: $p = 0.003$, $d = 0.916$) (Figura 7.1). Cabe decir que, si bien en la cohorte de ejercicio solo se observó una tendencia para la variable RL-RMSE, el tamaño del efecto encontrado en esta comparación fue grande.

Tabla 7.2. Resultados del análisis del set AD de la tarea rVMA

Variable	Efecto principal o interacción	df	F	p	η^2p	Potencia	Post-hoc
MT*	EDAD	58,3	0.024	0.877	0.000	0.053	
	COHORTE	58,3	3.494	0.067	0.057	0.452	
	EDAD x COHORTE	58,3	0.756	0.388	0.013	0.137	
TD*	EDAD	58,3	3.285	0.075	0.054	0.430	
	COHORTE	58,3	0.071	0.790	0.001	0.058	
	EDAD x COHORTE	58,3	0.054	0.817	0.001	0.056	
RT*	EDAD	58,3	0.195	0.660	0.003	0.072	
	COHORTE	58,3	0.932	0.338	0.016	0.158	
	EDAD x COHORTE	58,3	1.827	0.182	0.031	0.265	
IDE*	EDAD	58,3	21.791	0.000	0.273	0.996	ADULTOS < NIÑOS
	COHORTE	58,3	1.482	0.228	0.025	0.224	
	EDAD x COHORTE	58,3	1.456	0.232	0.024	0.221	
RMSE*	EDAD	58,3	16.195	0.000	0.218	0.977	ADULTOS < NIÑOS
	COHORTE	58,3	0.520	0.474	0.009	0.109	
	EDAD x COHORTE	58,3	0.536	0.467	0.009	0.111	
RL-IDE	EDAD	52,3	16.027	0.000	0.236	0.975	ADULTOS < NIÑOS
	COHORTE	52,3	0.102	0.751	0.002	0.061	
	EDAD x COHORTE	52,3	0.073	0.788	0.001	0.058	
RL-RMSE	EDAD	52,3	10.748	0.002	0.171	0.896	ADULTOS < NIÑOS
	COHORTE	52,3	0.022	0.883	0.000	0.052	
	EDAD x COHORTE	52,3	0.083	0.774	0.002	0.059	

Variables normalizadas*. Las diferencias significativas han sido resaltadas en negrita y sombreadas

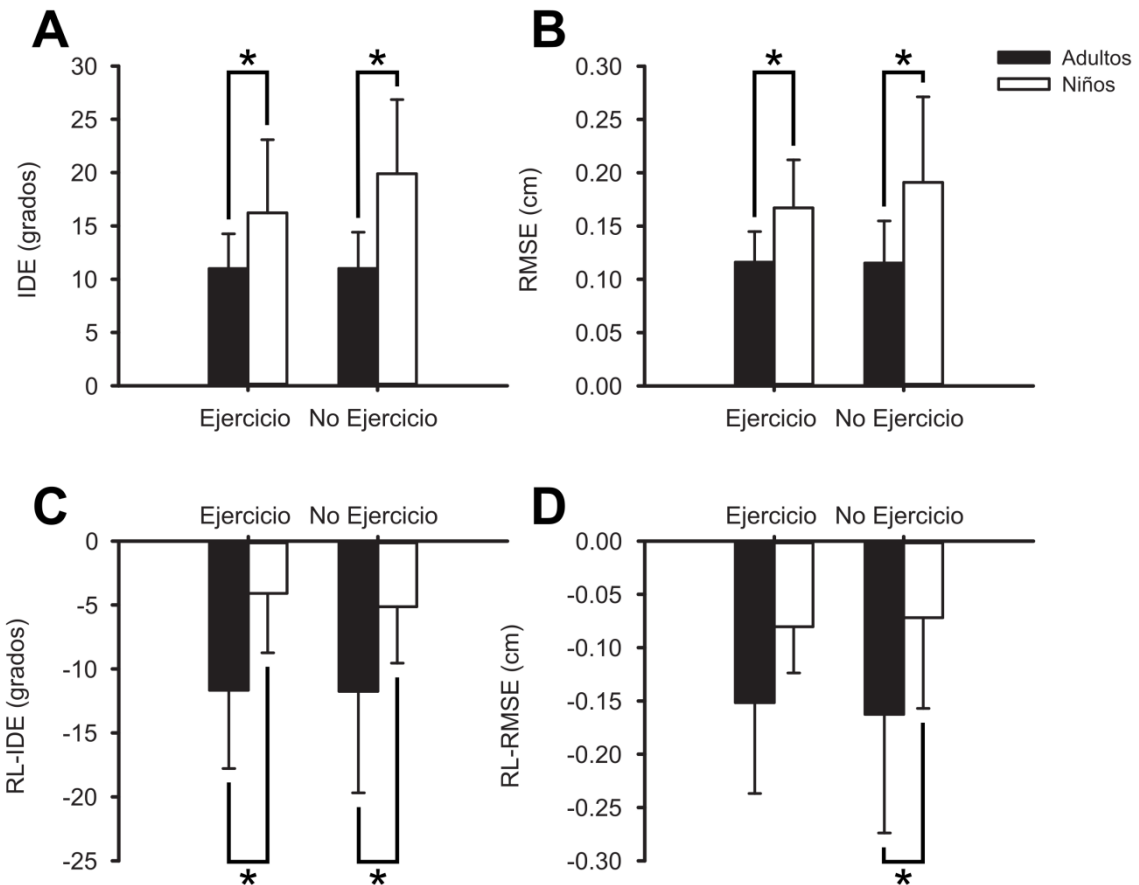


Figura 7.1. Promedios del error y la ratio de aprendizaje de las cohortes y grupos de edad durante el set AD de la tarea rVMA. Comparación del rendimiento y de la ratio de aprendizaje de los grupos de edad pertenecientes a las cohortes de ejercicio (grupo EX-rVMA) y no ejercicio (grupos rVMA-EX y CON). En el gráfico (A): comparación del error direccional inicial (*Initial Deviation Error*, IDE). En el gráfico (B): comparación de la raíz del promedio de los errores al cuadrado (*Root Mean Square Error*, RMSE). En el gráfico (C): comparación de la ratio de aprendizaje (*Rate Learning*, RL) del IDE (RL-IDE). En el gráfico (D): comparación del RL del RMSE (RL-RMSE). Las diferencias significativas fueron representadas con (*)

7.3.4 Comparación del efecto del ejercicio sobre la consolidación motora entre adultos y niños

La comparación del efecto del ejercicio (Grupo) sobre la consolidación de la memoria motora (Sets) en las poblaciones de los dos estudios (Edad) se realizó utilizando ANOVAs de medidas repetidas (ver los resultados en la Tabla 7.3 y la Tabla 7.4). Se encontró un efecto principal del Set para las variables descriptivas TD y RT. En el caso del TD, se observaron trayectorias más cortas en el set RT1 en comparación con los sets RT24 ($p = 0.001$; $d = 0.530$) y RT7d ($p = 0.001$; $d = 0.509$). En el caso del RT, se

observó un decremento del tiempo de reacción al estímulo desde el set RT1 al RT7d ($p = 0.019$; $d = 0.285$).

Al margen de las variables descriptivas del movimiento, también se encontró un efecto principal del Set sobre la variable de error RMSE, donde se observó un error mayor en el set RT24 en comparación con el RT1 ($p = 0.001$; $d = 0.274$) y el RT7d ($p = 0.003$; $d = 0.274$). Cuando se realizaron las comparaciones para analizar el efecto principal de Edad, se observó que los adultos presentaban un TD menor al de los niños. Así mismo y en cuanto a las variables de error, se reveló un efecto principal de Edad para el IDE y el RMSE, donde los adultos mostraron menores valores de error en comparación a los niños. Al analizar los efectos del Grupo sobre los parámetros de estudio, se halló un efecto principal para las dos variables de error dado que se advirtió un error mayor en los participantes del grupo CON en comparación a los del grupo EX-rVMA (IDE: $p = 0.011$, $d = 0.879$; RMSE: $p = 0.011$, $d = 0.855$).

Durante el estudio de las interacciones, se observó un efecto de la interacción entre los Sets y la Edad para la variable RMSE, donde los adultos presentaban menores valores de error tanto en el set RT1 ($p = 0.001$; $d = 0.954$) como en el RT24 ($p = 0.021$; $d = 0.596$) comparados con los niños, pero no así para el set RT7d. Tanto la interacción entre el Grupo y Edad de los participantes como la triple interacción entre Set, Grupo y Edad no mostraron un efecto significativo para ninguna de las comparaciones, aunque la interacción Grupo x Edad mostró una tendencia en las variables IDE y RMSE. A pesar de no hallar un efecto de la interacción de estos factores, se realizaron comparaciones planificadas para las dos variables de error estudiadas: IDE y RMSE. Para el caso de la interacción Grupo x Edad, se observó que en ambas variables solo los participantes del

grupo CON presentaron diferencias entre adultos y niños (IDE: $p = 0.006$, $d = 1.096$; RMSE: $p = 0.001$, $d = 1.152$) (Figura 7.2). Estas diferencias fueron mantenidas durante el análisis de la triple interacción Set x Grupo x Edad, donde las comparaciones por pares de la variable IDE mostraron cómo los participantes del grupo CON presentaban un IDE menor en los participantes adultos en comparación con los niños en todos los sets de retención (RT1: $p = 0.012$, $d = 0.949$; RT24: $p = 0.008$, $d = 1.294$; y RT7d: $p = 0.027$, $d = 1.131$) pero no así en los otros grupos.

En cuanto al RMSE, se observó una situación parecida donde los adultos presentaron menor error que los niños mayoritariamente en el grupo CON (RT1: $p = 0.002$, $d = 1.071$; RT24: $p = 0.002$, $d = 1.190$; y RT7d: $p = 0.010$, $d = 1.203$). No obstante, en el caso del grupo rVMA-EX, los adultos también mostraron un menor error en comparación a los niños, aunque solo durante el RT1 ($p = 0.013$, $d = 1.264$), siendo el rendimiento similar para los sets RT24 y RT7d.

Tabla 7.3. Resultados del análisis de las variables descriptivas del movimiento de los sets RT1, RT24 y RT7d de la tarea rVMA

Variable	Efecto principal o interacción	df	F	p	η^2p	Potencia	Post-hoc
MT	SET	56,5	1.116	0.331	0.020	0.242	
	EDAD	56,5	0.018	0.894	0.000	0.052	
	GRUPO	56,5	0.774	0.466	0.027	0.175	
	SET x GRUPO	56,5	1.330	0.263	0.045	0.404	
	SET x EDAD	56,5	0.918	0.402	0.016	0.205	
	GRUPO x EDAD	56,5	0.363	0.697	0.013	0.105	
	SET x GRUPO x EDAD	56,5	0.948	0.439	0.033	0.292	
TD	SET	56,5	17.981	0.000	0.243	1.000	RT1 < RT24, RT7d
	EDAD	56,5	6.767	0.012	0.108	0.725	ADULTOS < NIÑOS
	GRUPO	56,5	0.311	0.734	0.011	0.097	
	SET x GRUPO	56,5	0.941	0.443	0.033	0.290	
	SET x EDAD	56,5	2.442	0.092	0.042	0.483	
	GRUPO x EDAD	56,5	0.684	0.509	0.024	0.160	
	SET x GRUPO x EDAD	56,5	1.538	0.196	0.052	0.463	
RT	SET	56,5	5.095	0.010	0.083	0.781	RT7d < RT1
	EDAD	56,5	2.941	0.092	0.050	0.392	
	GRUPO	56,5	1.355	0.266	0.046	0.280	
	SET x GRUPO	56,5	1.288	0.281	0.044	0.369	
	SET x EDAD	56,5	2.466	0.096	0.042	0.460	
	GRUPO x EDAD	56,5	0.002	0.998	0.000	0.050	
	SET x GRUPO x EDAD	56,5	0.613	0.638	0.021	0.187	

Todas las variables analizadas fueron normalizadas. Las diferencias significativas han sido resaltadas en negrita y sombreadas

Tabla 7.4. Resultados del análisis de las variables de error de los sets RT1, RT24 y RT7d de la tarea rVMA

Variable	Efecto principal o interacción	df	F	p	η^2p	Potencia	Post-hoc
IDE	SET	56,5	1.036	0.352	0.018	0.215	
	EDAD	56,5	4.627	0.036	0.076	0.561	ADULTOS < NIÑOS
	GRUPO	56,5	4.992	0.010	0.151	0.792	EX-rVMA < CON
	SET x GRUPO	56,5	1.724	0.158	0.058	0.480	
	SET x EDAD	56,5	2.696	0.079	0.046	0.493	
	GRUPO x EDAD	56,5	2.562	0.086	0.084	0.491	
	SET x GRUPO x EDAD	56,5	0.635	0.621	0.022	0.192	
RMSE	SET	56,5	8.642	0.000	0.134	0.965	RT1 < RT24; RT7d < RT24
	EDAD	56,5	8.989	0.004	0.138	0.838	ADULTOS < NIÑOS
	GRUPO	56,5	4.660	0.013	0.143	0.762	EX-rVMA < CON
	SET x GRUPO	56,5	2.120	0.083	0.070	0.613	
	SET x EDAD	56,5	5.721	0.004	0.093	0.857	RT1, RT24: ADULTOS < NIÑOS; RT7d: ADULTOS = NIÑOS
	GRUPO x EDAD	56,5	2.544	0.088	0.083	0.488	
	SET x GRUPO x EDAD	56,5	0.772	0.546	0.027	0.241	

Todas las variables analizadas fueron normalizadas. Las diferencias significativas han sido resaltadas en negrita y sombreadas

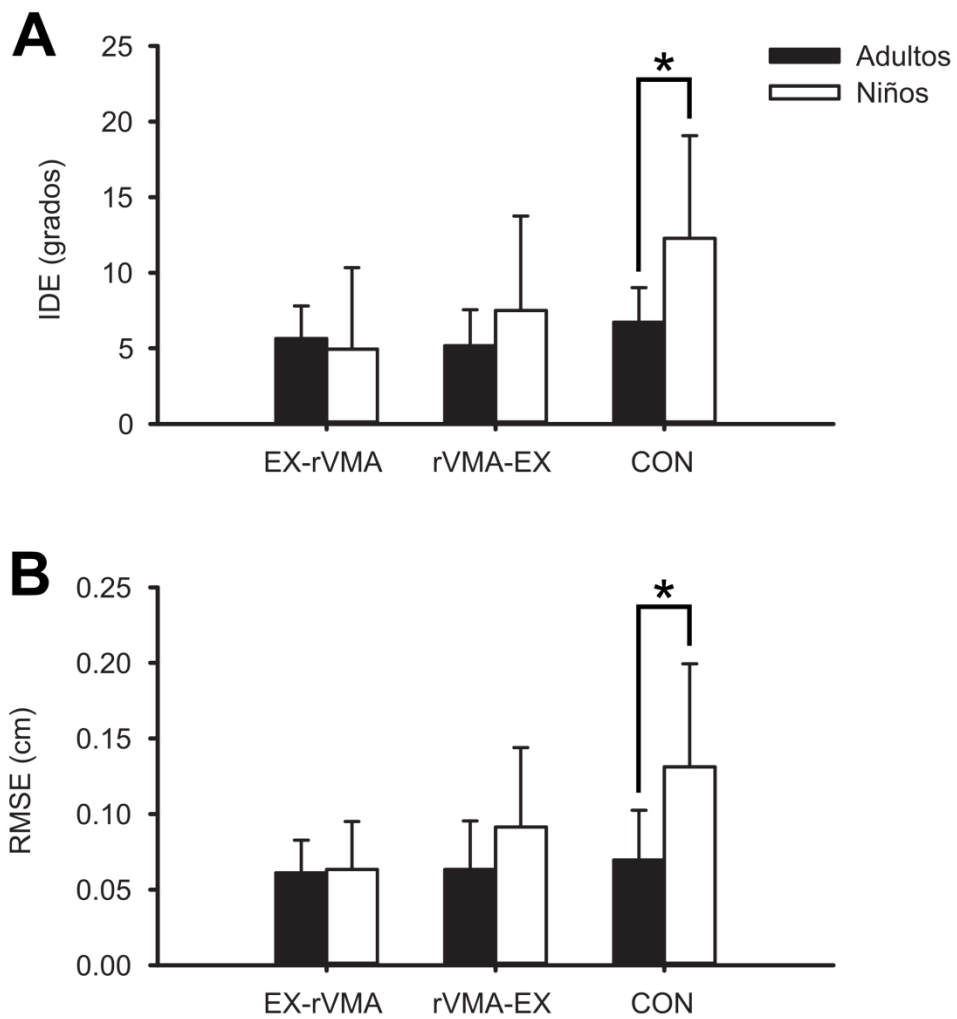


Figura 7.2. Promedio del error de las retenciones para la interacción de los factores grupo y edad. Comparación del rendimiento en la tarea rVMA entre los dos grupos de edad y para cada grupo experimental. Las variables comparadas son (A) el *Initial Deviation Error* (IDE) y (B) el *Root Mean Square Error* (RMSE). Abreviaciones: EX-rVMA, práctica de ejercicio antes de la adaptación motora; rVMA-EX, práctica de ejercicio después de la adaptación motora; CON, solo adaptación motora.

7.4 Discusión

7.4.1 Rendimiento basal de adultos y niños en la tarea rVMA

Se comparó el rendimiento basal de los niños y los adultos en la tarea rVMA para evaluar las posibles diferencias que pudiesen existir en cuanto al desarrollo motor entre los dos grupos de edad. Se hipotetizó que los niños presentarían un rendimiento inferior al de los adultos en las condiciones basales de la tarea rVMA. Esta hipótesis se fijó basándonos en estudios previos donde se han observado diferencias importantes entre niños y adultos en cuanto al desarrollo y rendimiento en tareas de adaptación visuomotora (Davies, Gehringer, & Kurz, 2015; Ferrel et al., 2001; Leversen et al., 2012; Tahej et al., 2012). Acorde a la hipótesis planteada, los niños, presentaron un movimiento con mayor duración (MT) y trayectoria recorrida (TD) en comparación con los adultos, lo cual podría relacionarse con una trayectoria menos directa y con una velocidad de desplazamiento menor. Así mismo, también presentaron un tiempo de reacción (RT) mayor ante la aparición del punto objetivo al cual debían dirigir sus movimientos en la tarea motora. En cuanto al error, los niños mostraron un mayor IDE en comparación con los adultos. La variable IDE se utilizó como parámetro para valorar el error previo a la posibilidad de aplicar correcciones guiadas a través del *feedback* perceptual (Contreras-Vidal et al., 2005) y, por lo tanto, podría indicar que los niños presentaron una peor planificación motora que los adultos. Así mismo, los niños también mostraron un error mayor durante toda la trayectoria del movimiento (mayor RMSE), de forma que presentaron un movimiento menos directo hacia el punto objetivo. Esta situación podría verse provocada o afectada por un mayor IDE, aunque creemos que también podría reflejar un uso menos eficiente de las correcciones

guiadas por el *feedback* perceptual durante el movimiento del *joystick* (Contreras-Vidal et al., 2005). En resumen, los movimientos de los niños en condiciones de no rotación fueron más lentos y menos precisos que los de los adultos.

Con el objetivo de reducir la variabilidad habitualmente presente en los niños en este tipo de tareas, las variables de los subsiguientes sets de la tarea rVMA (AD, RT1, RT24, RT7d) se normalizaron a partir de los valores correspondientes del set BA. Así mismo, esta normalización ayudó a reducir el impacto de las diferencias observadas a nivel basal entre niños y adultos, facilitando de este modo la comparación de los efectos del ejercicio sobre la adaptación y consolidación de la rotación visuomotora presentada. De este modo, y en adelante, al discutirse posibles diferencias de rendimiento entre niños y adultos, deberá tenerse en cuenta que dichas diferencias harán referencia a los valores de rendimiento relativos al rendimiento basal en la tarea rVMA.

7.4.2 Efectos del ejercicio sobre la adaptación de la tarea rVMA en adultos y niños

En relación al efecto del ejercicio sobre la adaptación motora, hipotetizamos que el rendimiento de los participantes adultos sería mayor que el de los niños durante la adaptación de la tarea rVMA. Esta hipótesis fue basada en el hecho de que el proceso de adaptación de la información perceptual en las tareas de adaptación visuomotora parece refinarse con la edad, de modo que los niños presentan un ritmo de adaptación y rendimiento inferiores al de los adultos (Contreras-Vidal et al., 2005). Además, parece ser que esta situación no podría ser mitigada a través del ejercicio, ya que los resultados de investigaciones previas (Roig et al., 2012), y de los estudios 1 y 2 de la presente tesis, mostraron cómo el ejercicio de intensidad elevada no tuvo un efecto sobre la adaptación motora.

De forma similar a la hipótesis formulada observamos que, a pesar de no existir diferencias en cuanto a la aproximación de movimiento utilizada por un grupo de edad u otro, sí que se encontró un mayor error en el caso de los niños, tanto al inicio del movimiento (IDE) como durante toda su trayectoria (RMSE). Así mismo, también se halló que la ratio de aprendizaje de los participantes adultos (RL-IDE y RL-RMSE) había sido mayor a la de los niños. De esta manera, no solo el error promedio durante la AD había sido inferior para los adultos sino que, además, el ritmo al que se redujo dicho error fue más rápido.

Se pudo observar también cómo estas diferencias entre niños y adultos se mantenían al observar por separado las dos cohortes comparadas, de modo que los adultos seguían presentando un menor error promedio y un mayor ritmo de adaptación tanto si los participantes habían practicado ejercicio antes de realizar la AD (cohorte de ejercicio) como si no (cohorte de no ejercicio). Dada esta situación, creemos que el ejercicio no ha facilitado la adaptación de la tarea rVMA independientemente de la edad del participante. Estudios previos han observado cómo, mientras la realización de ejercicio de intensidad moderada puede ejercer un efecto beneficioso sobre la adaptación motora de adultos (Snow et al., 2016; Statton et al., 2015), el ejercicio de elevada intensidad puede producir un efecto nulo sobre el proceso de adaptación, posiblemente a partir de la inducción de cierto nivel de fatiga durante el ejercicio (Roig et al., 2012). Así mismo, también parece poder influir en esta situación una excesiva estimulación del sistema nervioso central, hecho que podría incluso llevar a una situación contraproducente en cuanto a la estimulación cognitiva producida a través del ejercicio (McMorris & Hale, 2012).

Aun así, y hasta donde llega nuestro conocimiento, el estudio 2 de la presente tesis doctoral fue el primer estudio donde se investigó el efecto del ejercicio sobre la adaptación de los aprendizajes motores en niños. De este modo, otros estudios donde se examine el efecto de ejercicios de diferente intensidad y de forma comparativa con población adulta serían necesarios para poder ampliar el conocimiento sobre el alcance de los beneficios del ejercicio sobre la adaptación motora en niños y la posibilidad de equiparar su rendimiento y ritmo de adaptación al de los adultos.

7.4.3 Efectos del ejercicio sobre la consolidación de la tarea rVMA en adultos y niños

Al contrario que en el caso de la adaptación donde el ejercicio parece tener un efecto nulo, son numerosos los casos donde se ha observado un efecto positivo del ejercicio de intensidad elevada sobre la consolidación motora tanto en adultos (Mang et al., 2014; Roig et al., 2016, 2012; Thomas, Beck, et al., 2016; Thomas, Flindtgaard, et al., 2016; Thomas, Johnsen, et al., 2016) como, aunque en menor medida, en niños (Lundbye-Jensen et al., 2017). Más allá de estos precedentes, observando los resultados de los estudios 1 y 2 de la presente tesis doctoral podemos comprobar cómo tanto niños como adultos obtuvieron una mejora en la consolidación de la tarea rVMA a partir de una intervención de ejercicio intenso. En el caso de los niños, los resultados mostraron un efecto positivo de mayor magnitud y longevidad en comparación con los adultos. Partiendo de estas evidencias, se hipotetizó que el ejercicio podría facilitar la consolidación motora de los niños en mayor medida que la de los adultos.

De acuerdo con la hipótesis formulada, los niños de los grupos de ejercicio mostraron valores de rendimiento (IDE y RMSE) muy similares a los observados en los adultos, en especial en el caso del grupo EX-rVMA donde esta tendencia fue observada en todos los sets de retención. En el grupo rVMA-EX, si bien se observaron rendimientos parejos a medio y largo plazo (RT24 y RT7d), a corto plazo (RT1) el rendimiento de los niños fue inferior al de los adultos. Por el contrario, los niños del grupo CON mostraron un rendimiento inferior (IDE y RMSE) al de los adultos en todos los sets de retención (RT1, RT24 y RT7d).

Además, también se observó cómo los niños del grupo CON realizaron movimientos más largos que los adultos, lo cual podría indicar que los movimientos realizados fueron más curvilíneos y se aumentaba así la distancia total recorrida. De este modo, y considerando las diferencias de rendimiento halladas entre adultos y niños durante la adaptación, parece ser que el ejercicio facilitó los procesos de consolidación de los niños en mayor medida que en los adultos, obteniendo ambos grupos de edad un rendimiento relativo (mejora respecto a su nivel basal) similar. Por el contrario, en ausencia de ejercicio, se mantendrían durante la consolidación las diferencias propias de la edad entre adultos y niños, ya observadas tanto a nivel basal como durante la adaptación motora.

Se cree que estos efectos positivos del ejercicio sobre la consolidación de la memoria motora podrían ser causados por una estimulación de los mecanismos relacionados con la plasticidad neuronal. En adultos, dos de los mecanismos que han sido relacionados con la mejora de la consolidación motora y el ejercicio físico son el incremento de la concentración en sangre de las catecolaminas y del factor

neurotrófico derivado del cerebro (BDNF) (Mang et al., 2014; Skriver et al., 2014). En niños, también se han observado incrementos en la secreción de catecolaminas a partir de la realización de ejercicio (Wigal et al., 2003), aunque no existe evidencia de su efecto sobre el aprendizaje motor o cómo afecta el ejercicio agudo a la secreción de factores tróficos como el BDNF.

De este modo, dada la limitada evidencia en relación con niños y a las dificultades para valorar los niveles de dichos compuestos neuroquímicos a nivel central en humanos, la interpretación de los mecanismos que soportan los resultados de estos estudios debe ser realizada con cautela. Más allá de los mecanismos que podría haber inducido esta mejora sobre la consolidación motora a partir del ejercicio, cabría también abordar el posible motivo por el cual los niños han presentado un efecto relativo mayor sobre la consolidación motora en comparación a los adultos como respuesta a la realización del ejercicio. A continuación, expondremos algunos de los factores que creemos que podrían haber precedido esta situación.

En primer lugar, en el caso de los participantes adultos la cantidad de práctica realizada durante el set AD podría haber sido suficiente para alcanzar un techo en el rendimiento. Por el contrario, los niños requirieron un número de intentos mayor para adaptarse a la rotación de la tarea motora (menor ratio de aprendizaje) y su error promedio fue mayor que el de los adultos, de modo que creemos que el margen de mejora de los niños durante el set AD podría considerarse mayor. De hecho, en un estudio reciente se ha observado que niños y adultos presentan diferentes estrategias durante el aprendizaje de una tarea motora (Du et al., 2017). En este estudio se observó cómo los adultos mostraban una ratio de aprendizaje muy elevada durante el

inicio de la práctica en la tarea motora y cómo la mejora de su rendimiento sucedía intento a intento durante los propios bloques de práctica de la habilidad (aprendizaje *online*). Por el contrario, observó que los niños (especialmente los más jóvenes, 6 años) no eran capaces de manifestar las mejoras de rendimiento hasta haber pasado un periodo de no práctica (aprendizaje *offline*), manteniendo un nivel de rendimiento similar durante los intentos de cada bloque de práctica. De esta forma, dado el alto rendimiento alcanzado por los adultos al final de la adaptación, el efecto del ejercicio sobre su consolidación motora podría haber sido relativamente limitado, ya que se presentó efecto solo en la RT1 tal y como se expuso en el estudio 1 de la tesis. Por el contrario, en el caso de los niños la práctica de ejercicio y la facilitación de los procesos de consolidación podrían haber paliado las dificultades experimentadas durante la adaptación y facilitado los procesos de aprendizaje *offline*, de los cuales parecen ser más dependientes. De esta forma, los niños habrían sido capaces de equiparar su rendimiento relativo al de los adultos durante los sets de retención.

En segundo lugar, otro de los factores que podría haber contribuido a un mayor efecto del ejercicio sobre los niños es, posiblemente, una mayor predisposición de su sistema nervioso central a la activación de los mecanismos responsables de la plasticidad neuronal. Esta predisposición podría deberse a la plasticidad neuronal relacionada con el desarrollo, la cual sucede durante los llamados periodos sensibles del desarrollo del organismo (Knudsen, 2004). Estos periodos sensibles están relacionados con una mayor actividad de los procesos de consolidación de la información sensorial y existen varios periodos sensibles a lo largo de la vida y para cada modalidad sensorial (para una revisión ver Rohlfs Domínguez, 2014). Una de las situaciones más estudiadas en relación al aprendizaje durante los periodos sensibles ha sido el caso del aprendizaje

musical. Existe evidencia de que la enseñanza musical temprana (antes de los 5 años y en pleno proceso de desarrollo del sistema nervioso) tiene un impacto directo sobre el rendimiento del aprendizaje musical, así como un impacto sobre las estructuras cerebrales relacionadas con este aprendizaje, hecho que no ha sido observado en personas que iniciaron su enseñanza musical a edades más avanzadas (White, Hutka, Williams, & Moreno, 2013).

En relación al control de los movimientos de la mano, una de las formas de medir el grado de desarrollo del sistema nervioso es a través del estudio de la velocidad de conducción del tracto cortico-espinal (Udupa & Chen, 2013). Si bien se ha observado que en niños de entre 5 y 10 años de edad, bajo condiciones de facilitación, esta velocidad de conducción es similar a la de los adultos, en condiciones de relajación existen diferencias entre unos y otros (Heinen, Fietzek, Berweck, & Hufschmidt, 1998; Lahr, Elisabeth, Disorders, & Clinics, 2000). Estas diferencias de conducción del tracto cortico-espinal han sido relacionadas con diferencias de rendimiento en varias tareas motoras y se han asociado a una organización pre-motora sináptica inmadura. De forma especulativa, podríamos relacionar entonces este estado de inmadurez del sistema nervioso a un estado de sensibilidad asociado a una mayor plasticidad neuronal, similar a lo observado en el caso del aprendizaje musical. De este modo, el estado de desarrollo del sistema nervioso de los participantes del estudio 2 de esta tesis podría haber incrementado la respuesta a la práctica de ejercicio y así facilitar en mayor medida la consolidación de la tarea motora. Así, esta situación podría explicar, en parte, el mayor efecto observado en el caso de los niños en cuanto a la consolidación de la tarea rVMA.

Por último, otro de los factores que podría haber modulado los beneficios del ejercicio sobre la consolidación motora es el nivel de condición física de los participantes. Parece ser que el mayor efecto sobre la consolidación de la memoria a partir de una intervención aguda de ejercicio se obtendría cuando el nivel de condición física cardiovascular de los individuos es de un nivel moderado (Roig et al., 2013). A pesar de que no está del todo claro cuál es el papel del nivel de condición física en el binomio ejercicio-consolidación, parece ser que este factor podría actuar regulando la estimulación inducida por el ejercicio sobre los mecanismos responsables de la promoción de la plasticidad neural (p. ej. la producción del BDNF) (Currie, Ramsbottom, Ludlow, Nevill, & Gilder, 2009).

En la presente comparación, encontramos diferencias entre adultos y niños a nivel del $VO_2\text{max}$ estimado, siendo este parámetro inferior para los niños. De este modo, podríamos considerar que en esta situación el nivel de condición física de los participantes podría actuar como una posible causa moduladora del efecto del ejercicio, beneficiando en este caso a los niños. Aun así, la escasa evidencia existente en relación a la función del nivel de condición física como modulador del efecto del ejercicio, junto con el escaso conocimiento existente en relación a los mecanismos responsables de dicho efecto, limitan mayores especulaciones en torno a esta situación.

Este análisis comparativo de los estudios 1 y 2 de la presente tesis doctoral añade una nueva evidencia acerca de cómo una sesión de ejercicio intenso puede facilitar la consolidación motora de los niños equiparando su aprendizaje motor relativo (al rendimiento basal) al de los adultos. De igual manera, parece ser que los niños

obtendrían mayores beneficios derivados de la práctica aguda de ejercicio en comparación a los adultos a causa de un mayor margen de mejora, motivado por una mayor predisposición a la plasticidad neuronal relacionada con el desarrollo y por un efecto modulador del nivel de condición física. Aun así, harían falta futuros estudios para poder confirmar ambas aportaciones y definir con mayor profundidad el rol de los factores propuestos como moduladores del mayor efecto del ejercicio sobre la consolidación motora de los niños.

7.4.4 Efecto del orden de presentación del ejercicio y la tarea motora sobre la consolidación de la tarea rVMA en adultos y niños

Por último, en relación al orden de presentación del iE y la AD de la tarea rVMA, hipotetizamos que la presentación del iE antes de la AD (grupo EX-rVMA) facilitaría en mayor medida la obtención de un nivel de rendimiento similar al de los adultos durante los sets de retención. Esta hipótesis fue formulada basándonos en los resultados del estudio 2 de la tesis doctoral donde observamos cómo el grupo EX-rVMA presentaba un mayor efecto del ejercicio sobre la consolidación motora que el grupo rVMA-EX. De forma parcial a cómo habíamos propuesto en la hipótesis, a pesar de que ambos grupos de niños (EX-rVMA y rVMA-EX) mostraron un rendimiento muy similar al de los adultos durante los sets de retención, el grupo rVMA-EX de niños mostró un rendimiento inferior durante la RT1 para la variable RMSE. De este modo, parece ser que, de forma similar a lo sucedido en el caso del estudio 2 de la tesis, los mejores beneficios fueron obtenidos por parte de los niños del grupo EX-rVMA. De la misma forma que se expuso en el caso del estudio 2 de la tesis, creemos que este

mayor efecto del ejercicio sobre la consolidación motora cuando el ejercicio es presentado antes de la adaptación podría deberse a la rapidez con la que suceden los procesos de consolidación de la memoria motora en los niños (Dorfberger et al., 2007). Debido a esta rapidez en la formación de la memoria motora, la práctica de ejercicio intenso previa al inicio de la consolidación podría derivar en una mejor disponibilidad de las secreciones precursoras de la plasticidad neuronal (catecolaminas y BDNF) desde el inicio del proceso de consolidación. Aun así, dada la escasez de evidencia en torno al efecto del ejercicio sobre el aprendizaje motor en el caso de niños, serían necesarios más estudios donde se analizase el efecto modulador del orden de presentación del ejercicio en relación a la tarea motora con el objetivo de poder corroborar el presente resultado.

7.5 Conclusiones de la comparativa entre los estudios 1 y 2 de la tesis doctoral

La utilización de intervenciones idénticas de ejercicio intenso facilitó los procesos de consolidación de la memoria motora de los niños en mayor medida que los de los adultos. Así, la práctica de ejercicio permitió que el rendimiento relativo de los niños y los adultos en las retenciones de la tarea rVMA fuese comparable, especialmente cuando el ejercicio se presentó antes de la adaptación en la tarea motora. Estos beneficios sobre el rendimiento en las retenciones de la tarea rVMA fueron relativos al rendimiento basal de la tarea, donde los adultos mostraron una amplia ventaja sobre los niños dado un mayor nivel de desarrollo motor. Por el contrario, a pesar de los efectos positivos observados sobre la consolidación, la práctica de ejercicio previa a la adaptación no mostró ningún beneficio sobre este proceso.

En resumen, parece ser que la práctica de ejercicio intenso puede resultar una estrategia eficaz para facilitar el aprendizaje motor de los niños, acercando así su rendimiento motor al de los adultos.

Capítulo 8: Discusión general, conclusiones, recomendaciones prácticas y líneas de futuro



8.1 Discusión general

El objetivo general de la presente tesis doctoral fue el de evaluar los efectos de una sesión de ejercicio intenso (iE) sobre los procesos de adaptación y consolidación de la tarea de Adaptación Visuomotora rotacional (rVMA), tanto en población adulta como en población infantil. Además, también se quisieron analizar los posibles efectos del orden de presentación del iE y la rVMA y el efecto de la duración del iE.

8.1.1 Efectos del iE sobre el aprendizaje de la tarea rVMA en adultos

En el primer estudio de la tesis se evaluó el efecto del ejercicio sobre el aprendizaje motor en adultos y el posible efecto del orden de presentación en iE y la rVMA.

Efectos del ejercicio sobre el proceso de adaptación

En adultos, no observamos una estimulación de los procesos de adaptación a partir de la realización de ejercicio inmediatamente anterior a la práctica inicial en la tarea rVMA. De acuerdo con resultados previos (Roig et al., 2012), creemos que la ejecución de ejercicio intenso próximo a la práctica en la tarea rVMA pudo haber interferido en los posibles beneficios del ejercicio sobre la adaptación motora, a partir de la inducción de fatiga. Así mismo, parece ser que existe una relación dosis-efecto entre la intensidad de ejercicio y los beneficios obtenidos en la capacidad cognitiva (McMorris & Hale, 2012) y la estimulación de los procesos de aprendizaje motor (Taubert et al., 2015). De este modo, mientras que un ejercicio de intensidad moderada podría facilitar la adaptación motora (Snow et al., 2016; Statton et al., 2015), el ejercicio intenso produciría mejores beneficios sobre los procesos de consolidación (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012; Thomas, Johnsen, et al., 2016).

Efectos del ejercicio sobre el proceso de consolidación

De forma similar a los efectos positivos del ejercicio observados con anterioridad (Roig et al., 2012), si bien el iE no produjo un beneficio sobre la adaptación motora en los adultos, sí que facilitó el proceso de consolidación de la tarea rVMA. Concretamente, se observó una mejor consolidación de la tarea motora a corto plazo (1 h desde la adaptación) tanto cuando el ejercicio fue presentado antes como después de la adaptación de la tarea. Esta mejora del proceso de consolidación fue observada a razón de una mejor planificación del movimiento a partir del modelo interno de la habilidad, cuantificada en el caso de esta tesis doctoral por la variable del error direccional inicial (IDE), de forma similar a como se ha hecho en estudios previos (Contreras-Vidal et al., 2005).

Aun así, en comparación con otros estudios en los cuales se observaron beneficios a medio (24 h) y largo plazo (7 días) (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012), los beneficios observados en nuestro estudio fueron menores. Creemos que este efecto más reducido del iE sobre la consolidación motora podría haberse debido a la interacción de tres factores que habrían actuado como moduladores de la relación entre el ejercicio y el aprendizaje motor: (1) la menor intensidad del iE presentado en comparación con estudios previos (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012); (2) el mayor nivel de condición física de los participantes adultos de nuestro estudio (Roig et al., 2013); y (3) el hecho de que los estudios previos hayan utilizado tareas motoras más sencillas y que impliquen de forma exclusiva o parcial un paradigma de aprendizaje diferente (aprendizaje de secuencias) (Mang et al., 2014; Roig et al., 2012).

A pesar de que en esta tesis doctoral no han sido valorados, puesto que nuestro estudio se ha limitado a la evaluación de los cambios producidos en el comportamiento motor, se han propuesto algunos mecanismos como posible enlace entre la realización del ejercicio y estos beneficios observados en el aprendizaje. Parece ser que estos beneficios observados en la consolidación motora serían causados por una facilitación de la neuroplasticidad relacionada con el aprendizaje motor (Taubert et al., 2015). El ejercicio, parece activar el sistema noradrenérgico y promover la secreción del factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF), los cuales han sido relacionados con mejoras en el paso de la memoria declarativa (Segal et al., 2012; Winter et al., 2007) y procedural (Skriver et al., 2014) de un estado frágil a su almacenamiento en la memoria a largo plazo.

El incremento en la concentración de BDNF parece tener un interés relevante dada su asociación con funciones relacionadas a los mecanismos de la potenciación a largo plazo (LTP) (Bekinschtein et al., 2008), vinculados a la consolidación de la memoria. La elevación periférica de los niveles de BDNF inducida por el ejercicio fue relacionada por primera vez con un fortalecimiento de parámetros del comportamiento motor por Skriver et al. (2014). Estos autores observaron que los incrementos en la concentración periférica del BDNF estaban asociados con la retención de una tarea visuomotora al cabo de 1h y 7 días desde su adaptación. Además, también encontraron que la secreción periférica de noradrenalina estaba asociada a una mejor adaptación y retención a los 7 días, mostrándose también una tendencia de correlación en las retenciones 1h y 24h (Skriver et al., 2014).

A pesar de la falta de evidencia ya mencionada en el capítulo 1 de la tesis en relación a los niños, creemos que los mecanismos citados como intermediarios de la relación entre el ejercicio y aprendizaje podrían ser comunes, aunque será necesario su estudio para poder ratificar esta suposición. Así mismo, los estudios presentados para los adultos deben ser interpretados con cautela, ya que las correlaciones observadas no tienen por qué indicar una relación de causalidad. También hay que tener en cuenta las dificultades para medir la concentración de estos componentes neuroquímicos a nivel central en humanos. El hecho de que estos estudios hayan sido realizados midiendo la concentración periférica de dichos componentes, limita mayores especulaciones del papel real de estos mecanismos sobre la facilitación de la consolidación motora a nivel central. Así, harán falta más estudios con el fin de incrementar nuestro conocimiento y entendimiento de los mecanismos subyacentes a la relación entre el ejercicio físico y las mejoras inducidas por este en el aprendizaje motor.

Efectos del orden de presentación del ejercicio y la tarea motora

Por último, en el caso de los adultos, no se observaron diferencias producidas por el orden de presentación del iE y la rVMA. Este resultado contrasta con los obtenidos en el estudio de Roig et al. (2012), donde los mejores resultados fueron mostrados por los participantes que realizaron el ejercicio después de la adaptación en la tarea motora. Creemos que esta situación podría deberse al hecho de que los resultados del presente estudio se hayan limitado a un efecto a corto plazo, en contraposición a los presentados por Roig et al. (2012), donde las diferencias entre grupos de ejercicio no se observaron hasta al cabo de 7 días.

8.1.2 Efectos del iE sobre el aprendizaje de la tarea rVMA en niños

En relación a los niños, evaluamos el efecto del iE sobre el aprendizaje de la tarea rVMA, el posible orden de presentación del iE y la rVMA y también cómo podía afectar la duración del iE a la adaptación y consolidación de dicha tarea. También se compararon los resultados de los estudios 1 (adultos) y 2 (niños) con el objetivo de observar cómo el ejercicio podía afectar al proceso de aprendizaje de los niños en comparación a los efectos presentados por los adultos.

Efectos del ejercicio sobre el proceso de adaptación

En los niños, el iE no tuvo un efecto sobre el proceso de adaptación de la tarea rVMA, independientemente de la duración del ejercicio (corto o largo). Dada esta situación, cuando se compararon los resultados de los estudios 1 y 2 (ver Capítulo 7 de la tesis), se observó que las diferencias en el rendimiento de la tarea rVMA entre adultos y niños se mantenían durante el proceso de adaptación, tanto si se había realizado ejercicio antes de la tarea rVMA como si no. Así, creemos que de forma similar a la evidencia existente en el caso de los adultos, podría existir una relación dosis-efecto entre los beneficios del ejercicio y los procesos del aprendizaje motor (Taubert et al., 2015; Thomas, Johnsen, et al., 2016). De hecho, una relación dosis-efecto similar ya ha sido observada en el caso de los efectos del ejercicio sobre la función cognitiva de niños (St-Louis-Deschênes & Ellemberg, 2011; Tomporowski, McCullick, Pendleton, et al., 2015). Aun así, hasta donde llega nuestro conocimiento, no existe aún ningún estudio que haya evaluado los efectos del ejercicio moderado sobre el aprendizaje motor en niños, hecho que limita posibles especulaciones sobre esta relación dosis-efecto de la intensidad del ejercicio.

Efectos del ejercicio sobre el proceso de consolidación

Igual que en el caso de los adultos, y de forma contraria a lo observado en relación a la adaptación motora, el efecto general del ejercicio sobre el proceso de consolidación motora parece ser positivo. Esta mejora de la consolidación motora fue observada tanto a partir de un mayor rendimiento en cuanto a la planificación del movimiento (IDE) como en la utilización de los mecanismos de *feedback*, evaluados a partir de la variable de la raíz del promedio de los errores al cuadrado (RMSE), de forma similar a lo propuesto en otros estudios (Contreras-Vidal et al., 2005).

Resultados similares han sido mostrados en un estudio reciente donde la realización de ejercicio de intensidad elevada ha mostrado un efecto positivo sobre la consolidación motora en niños (Lundbye-Jensen et al., 2017). Además, a partir de lo observado en la comparación realizada en el Capítulo 7 de la tesis, parece que los niños se habrían beneficiado en mayor medida de la práctica de ejercicio que los adultos. A partir de la práctica de ejercicio, los niños consiguieron igualar el rendimiento relativo (al rendimiento basal en la tarea) de los adultos, situación que no se dio en ausencia de la práctica de ejercicio.

Creemos que uno de los factores que podría haber determinado esta mejora de los niños en mayor proporción que en los adultos es el elevado número de intentos de práctica durante la adaptación que pudieron causar un techo en el rendimiento de los adultos, quienes se adaptaron a la tarea con una ratio mucho más elevada que los niños. El hecho de alcanzar este techo en el rendimiento durante la adaptación, podría haber propiciado un menor efecto del ejercicio sobre la retención de los adultos, sobre todo teniendo en cuenta las diferencias entre niños y adultos en cuanto a los procesos

de aprendizaje. Mientras que los niños parecen depender en mayor medida del proceso de consolidación (aprendizaje *offline*), los adultos pueden fundamentar su aprendizaje en el proceso de adaptación (aprendizaje *online*) (Du et al., 2017).

Además de este factor, otra situación que podría haber determinado la mayor mejora de los niños en comparación a los adultos sería el menor nivel de maduración del sistema nervioso central. Los niños en comparación con los adultos presentarían un sistema nervioso menos maduro (Heinen et al., 1998; Lahr et al., 2000), lo cual se podría relacionar con una mayor plasticidad neuronal por parte de los niños (White et al., 2013) y, consecuentemente, con una posible mayor predisposición a los efectos positivos del ejercicio.

Efectos del orden de presentación del ejercicio y la tarea motora

Este efecto positivo del ejercicio sobre los procesos de consolidación, podría estar regulado por el orden de presentación del ejercicio y la tarea de aprendizaje. En el estudio 2 y el Capítulo 7 de la tesis, observamos que el efecto del ejercicio sobre los procesos de consolidación sería mayor cuando el ejercicio se ha realizado antes de la práctica de la tarea motora en niños. Esta situación contrasta con los resultados en adultos presentados por Roig et al. (2012), donde los mejores beneficios sobre la consolidación fueron observados cuando el ejercicio se ejecutó después de la práctica de la tarea. Creemos que esta situación podría deberse principalmente a las diferencias mostradas entre adultos y niños en las dinámicas de consolidación de los aprendizajes motores, ocurriendo el proceso de consolidación de los niños más rápido que el de los adultos (Dorfberger et al., 2007). De esta manera, podría considerarse que la realización de ejercicio previo a la práctica de la habilidad motora beneficiase en

mayor medida el rápido proceso de consolidación observado en los niños, mientras que la consolidación más lenta de los adultos se beneficiaría de la práctica de ejercicio después de la adaptación en la tarea motora. Esta situación podría ayudar a explicar, en parte, el motivo por el cual, en el estudio de Lundbye-Jensen et al. (2017), la práctica de ejercicio después de la tarea motora solo mostró beneficios en la retención a largo plazo.

Efectos de la duración del ejercicio

En relación a la duración de la sesión de ejercicio, si bien los mejores resultados (mayor efecto y longevidad de los beneficios) fueron observados a partir del iE largo, el iE corto también tuvo un impacto positivo sobre la consolidación motora. Mientras que en el caso del iE largo los beneficios fueron observados tanto en la planificación del movimiento como en la utilización de los mecanismos de *feedback* para todos los sets de retención, los efectos del iE corto se limitaron a la planificación del movimiento durante la retención a medio plazo (RT24h).

Aunque se han observado efectos positivos sobre el aprendizaje declarativo a partir de intervenciones de ejercicio cortas (Etnier et al., 2014), los resultados del estudio 3, hasta donde sabemos, constituyen la primera evidencia del efecto positivo de una intervención de ejercicio corta (solo 5 min) sobre la consolidación de los aprendizajes motores. Este hallazgo es de destacada importancia ya que, la posibilidad de estimular el aprendizaje motor a partir de una intervención corta de ejercicio abre una nueva ventana de opciones para la aplicación de este tipo de intervenciones en entornos donde, normalmente, existen restricciones de tiempo para poder aplicar un ejercicio

de mayor duración (p. ej. dentro del entorno de la escuela o el entorno del aprendizaje deportivo de base).

8.2 Conclusiones y recomendaciones prácticas

8.2.1 Conclusiones

En resumen, el ejercicio intenso facilitó los procesos de consolidación de la tarea rVMA tanto en adultos como en niños. En niños, los beneficios observados sobre la consolidación motora fueron de mayor importancia que los observados en adultos. Así mismo, en el caso de los niños, incluso cuando la duración del ejercicio se restringió a únicamente 5 min de duración se mostró un efecto positivo sobre la consolidación de la habilidad. En relación a estos beneficios, si bien en adultos no se observó una influencia del orden de presentación del ejercicio y la tarea motora, en niños los mejores efectos sobre la consolidación fueron observados cuando el ejercicio se realizó de manera previa a la práctica de la tarea motora. A pesar de los beneficios hallados sobre el proceso de consolidación, la adaptación a la tarea motora no se benefició de la práctica de ejercicio, por lo que se añade así evidencia a la posible relación dosis-efecto de la intensidad del ejercicio y sus efectos sobre el aprendizaje motor.

8.2.2 Recomendaciones prácticas

A partir de los resultados de los estudios presentados en esta tesis doctoral, creemos que la práctica de ejercicio agudo puede constituir una herramienta útil para favorecer el aprendizaje motor de los niños. Además, dada la corta duración del ejercicio necesaria para poder obtener estos beneficios, creemos que el ejercicio puede ser utilizado de forma eficiente en el entorno escolar y el entorno deportivo, donde

habitualmente existen restricciones de tiempo para poder aplicar este tipo de intervenciones.

Aun así, con tal de garantizar la obtención de los mejores beneficios posibles, creemos necesario realizar una serie de recomendaciones a la hora de utilizar el ejercicio con el fin de optimizar los procesos de aprendizaje motor de los niños. En primer lugar, estas intervenciones con ejercicio deberían ser aplicadas, preferentemente, antes de la práctica en la tarea motora, ya que hemos observado que bajo esta situación se obtienen mejores beneficios que cuando el ejercicio es realizado después. En segundo lugar, la intensidad del ejercicio debería ser elevada dado que los beneficios sobre el proceso de consolidación de los aprendizajes parecen depender de este parámetro del ejercicio. Por último, vistos los resultados obtenidos en relación a la duración del ejercicio creemos que, si bien el ejercicio de corta duración sería suficiente para estimular la consolidación motora, una intervención más larga produciría mayores beneficios y sería especialmente indicada si se prevé que la habilidad objetivo del aprendizaje no se volverá a practicar en un periodo mayor a 24 h.

8.3 Futuras líneas de investigación

A pesar de las evidencias aportadas en los estudios realizados en la presente tesis, siguen existiendo muchas incógnitas en relación a los efectos del ejercicio sobre el aprendizaje motor tanto de adultos como, especialmente, en niños. Puede que uno de los aspectos pendientes más relevantes sea el de definir los mecanismos responsables de los efectos del ejercicio sobre la capacidad de aprendizaje motor. Existen evidencias en adultos donde se han relacionado la práctica de ejercicio intenso con un incremento en la secreción periférica de catecolaminas y neurotróficos que, a su vez,

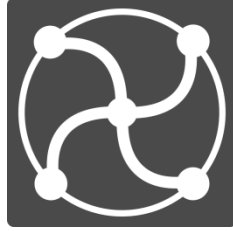
parecen relacionarse con la mejora en la consolidación motora (Mang et al., 2014; Skriver et al., 2014). Aun así, las dificultades para poder medir la concentración de estos compuestos a nivel central limitan la interpretación de los resultados de estos estudios. Así mismo, si bien existe evidencia de que a partir de la práctica de ejercicio se produce un incremento en la secreción periférica de catecolaminas en los niños, estos incrementos no han sido relacionados con su capacidad de aprendizaje. De este modo, creemos que ahondar en el estudio de estos mecanismos, especialmente en niños, debería ser una de las líneas de investigación futuras a tener presentes.

Otra posible línea de investigación podría girar en torno a la aplicación de los resultados de los presentes estudios en población con algún tipo de afección relacionada con el control y el aprendizaje motor. Creemos que la estimulación del aprendizaje motor a partir del ejercicio físico podría beneficiar, incluso en mayor medida que a la población sana, a este nuevo colectivo. De hecho existen ya algunos precedentes relacionados con la enfermedad de Parkinson, donde se ha observado que a partir de la práctica de ejercicio físico se puede estimular el aprendizaje motor y los mecanismos que se creen responsables de la relación entre el ejercicio y el aprendizaje (Duchesne et al., 2015; Petzinger et al., 2013). Así mismo, también existen ciertos colectivos infantiles que podrían beneficiarse de la relación entre el ejercicio y el aprendizaje motor. Uno de estos colectivos podría ser el de los niños que padecen el Trastorno del desarrollo de la coordinación (*Developmental Coordination Disorder*, DCD). Este colectivo muestra afectaciones muy diversas, pero algunas de las más frecuentes están relacionadas con el dominio sensorial, el motor y la integración de la información sensorial y motora (Visser, 2003). A partir de estas problemáticas, se ha observado en esta población una capacidad de adaptación y consolidación de los

aprendizajes motores reducida en comparación con niños de la misma edad con un desarrollo motor típico (Kagerer, Contreras-Vidal, Bo, & Clark, 2006). Dadas las dificultades para la ejecución y aprendizaje de tareas motoras en las dos poblaciones citadas (Parkinson y DCD), creemos que el estudio de posibles formas de estimulación de su aprendizaje motor (p. ej. a través del ejercicio) podría tener un impacto importante en el bienestar de estos individuos.

Por último, creemos que también sería importante prestar atención al estudio de los factores que parecen modular el efecto del ejercicio sobre la capacidad de aprendizaje. Si bien en adultos existe evidencia de que, por ejemplo, la intensidad del ejercicio presenta una relación dosis-efecto (Taubert et al., 2015; Thomas, Johnsen, et al., 2016), en el caso de los niños aún no se ha realizado ningún estudio donde se evalúe el efecto de intervenciones de diferente intensidad o se analicen los efectos del ejercicio de intensidad moderada sobre el aprendizaje motor. Tal y como se sugirió en el estudio 1, otros factores que podrían tener un impacto sobre el binomio ejercicio-aprendizaje motor podrían ser el nivel de rendimiento cardiovascular de los participantes y las características de la tarea. Especialmente en el caso de este último factor, creemos que sería necesario estudiar los efectos del ejercicio sobre una habilidad motora aplicada a una situación de la vida cotidiana o deportiva, permitiendo esta nueva línea de investigación generalizar los beneficios del ejercicio a nuevas situaciones de aprendizaje motor.

Bibliografía



- Bekinschtein, P., Cammarota, M., Izquierdo, I., & Medina, J. H. (2008). BDNF and memory formation and storage. *The Neuroscientist: A Review Journal Bringing Neurobiology, Neurology and Psychiatry*, *14*(2), 147–156. <http://doi.org/10.1177/1073858407305850>
- Benítez-Porres, J., López-Fernández, I., Raya, J. F., Álvarez Carnero, S., Alvero-Cruz, J. R., & Álvarez Carnero, E. (2016). Reliability and Validity of the PAQ-C Questionnaire to Assess Physical Activity in Children. *Journal of School Health*, *86*(9), 677–685. <http://doi.org/10.1111/josh.12418>
- Bernard, J. A., & Seidler, R. D. (2013). Cerebellar contributions to visuomotor adaptation and motor sequence learning: an ALE meta-analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 27. <http://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00027>
- Best, J. R. (2010). Effects of Physical Activity on Children’s Executive Function: Contributions of Experimental Research on Aerobic Exercise. *Developmental Review*, *30*(4), 331–351. <http://doi.org/doi:10.1016/j.dr.2010.08.001>
- Buch, E. R., Young, S., & Contreras-Vidal, J. L. (2003). Visuomotor Adaptation in Normal Aging. *Learning & Memory*, *10*(1), 55–63. <http://doi.org/10.1101/lm.50303>
- Castelli, D. M., Hillman, C. H., Buck, S. M., & Erwin, H. E. (2007). Physical fitness and academic achievement in third- and fifth-grade students. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, *29*(2), 239–252.
- Chaddock, L., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Kim, J. S., Voss, M. W., Vanpatter, M., ... Kramer, A. F. (2010). A neuroimaging investigation of the association between aerobic fitness, hippocampal volume, and memory performance in preadolescent children. *Brain Research*, *1358*, 172–183. <http://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.08.049>
- Chaddock, L., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Vanpatter, M., Voss, M. W., Pontifex, M. B., ... Kramer, A. F. (2010). Basal ganglia volume is associated with aerobic fitness in preadolescent children. *Developmental Neuroscience*, *32*(3), 249–256. <http://doi.org/10.1159/000316648>
- Chang, Y.-K., Chi, L., Etnier, J. L., Wang, C.-C., Chu, C.-H., & Zhou, C. (2014). Effect of acute aerobic exercise on cognitive performance: Role of cardiovascular fitness. *Psychology of Sport and Exercise*, *15*(5), 464–470. <http://doi.org/10.1016/j.psychsport.2014.04.007>
- Chang, Y.-K., Labban, J. D., Gapin, J. I., & Etnier, J. L. (2012). The effects of acute exercise on

- cognitive performance: a meta-analysis. *Brain Research*, 1453(250), 87–101.
<http://doi.org/10.1016/j.brainres.2012.02.068>
- Chen, A.-G., Yan, J., Yin, H.-C., Pan, C.-Y., & Chang, Y.-K. (2014). Effects of acute aerobic exercise on multiple aspects of executive function in preadolescent children. *Psychology of Sport and Exercise*, 15(6), 627–636. <http://doi.org/10.1016/j.psychsport.2014.06.004>
- Chen, A.-G., Zhu, L.-N., Yan, J., & Yin, H.-C. (2016). Neural Basis of Working Memory Enhancement after Acute Aerobic Exercise: fMRI Study of Preadolescent Children. *Frontiers in Psychology*, 7(November), 1804. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01804>
- Coats, R. O., Wilson, A. D., Snapp-Childs, W., Fath, A. J., & Bingham, G. P. (2014). The 50s cliff: perceptuo-motor learning rates across the lifespan. *PloS One*, 9(1), e85758. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0085758>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale (N.J.): Lawrence Erlbaum Associates. Retrieved from http://catalog.ub.edu/record=b1105334~S1*sp1
- Coles, K., & Tomporowski, P. D. (2008). Effects of acute exercise on executive processing, short-term and long-term memory. *Journal of Sports Sciences*, 26(3), 333–44. <http://doi.org/10.1080/02640410701591417>
- Contreras-Vidal, J. L., Bo, J., Boudreau, J. P., & Clark, J. E. (2005). Development of visuomotor representations for hand movement in young children. *Experimental Brain Research*, 162(2), 155–164. <http://doi.org/10.1007/s00221-004-2123-7>
- Currie, J., Ramsbottom, R., Ludlow, H., Nevill, A., & Gilder, M. (2009). Cardio-respiratory fitness, habitual physical activity and serum brain derived neurotrophic factor (BDNF) in men and women. *Neuroscience Letters*, 451(2), 152–155. <http://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.12.043>
- Davies, B. L., Gehringer, J. E., & Kurz, M. J. (2015). Age-related differences in the motor planning of a lower leg target matching task. *Human Movement Science*, 44(4), 299–306. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2015.10.002>
- Ding, Q., Vaynman, S., Akhavan, M., Ying, Z., & Gomez-Pinilla, F. (2006). Insulin-like growth factor I interfaces with brain-derived neurotrophic factor-mediated synaptic plasticity to modulate aspects of exercise-induced cognitive function. *Neuroscience*, 140(3), 823–33.

<http://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2006.02.084>

Dorfberger, S., Adi-Japha, E., & Karni, A. (2007). Reduced susceptibility to interference in the consolidation of motor memory before adolescence. *PLoS ONE*, 2(2), 1–6. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0000240>

Doyon, J., Penhune, V., & Ungerleider, L. G. (2003). Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia*, 41(3), 252–262. [http://doi.org/10.1016/S0028-3932\(02\)00158-6](http://doi.org/10.1016/S0028-3932(02)00158-6)

Du, Y., Valentini, N. C., Kim, M. J., Whittall, J., & Clark, J. E. (2017). Children and Adults Both Learn Motor Sequences Quickly, But Do So Differently. *Frontiers in Psychology*, 8(February), 1–10. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00158>

Duchesne, C., Lungu, O., Nadeau, A., Robillard, M. E., Boré, A., Bobeuf, F., ... Doyon, J. (2015). Enhancing both motor and cognitive functioning in Parkinson's disease: Aerobic exercise as a rehabilitative intervention. *Brain and Cognition*, 99, 68–77. <http://doi.org/10.1016/j.bandc.2015.07.005>

Engel, F. A., Sperlich, B., Stockinger, C., Härtel, S., Bös, K., & Holmberg, H.-C. (2015). The kinetics of blood lactate in boys during and following a single and repeated all-out sprints of cycling are different than in men. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 40(6), 623–631. <http://doi.org/10.1139/apnm-2014-0370>

Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., ... Kramer, A. F. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(7), 3017–3022. <http://doi.org/10.1073/pnas.1015950108>

Etnier, J., Labban, J. D., Piepmeyer, A., Davis, M. E., & Henning, D. A. (2014). Effects of an Acute Bout of Exercise on Memory in 6th Grade Children. *Pediatric Exercise Science*, 26(3), 250–258. <http://doi.org/10.1123/pes.2013-0141>

Fedewa, A. L., & Ahn, S. (2011). The Effects of Physical Activity and Physical Fitness on Children's Achievement and Cognitive Outcomes: A Meta-Analysis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 82(3), 521–535.

Ferrel, C., Bard, C., & Fleury, M. (2001). Coordination in childhood: modifications of visuomotor representations in 6- to 11-year-old children. *Experimental Brain Research*, 138(3), 313–

321. <http://doi.org/10.1007/s002210100697>

Ferrer-Uris, B., Busquets, A., Lopez-Alonso, V., Fernandez-del-Olmo, M., & Angulo-Barroso, R. (2017). Enhancing consolidation of a rotational visuomotor adaptation task through acute exercise. *PLOS ONE*, *12*(4), 1–18. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0175296>

Ferris, L. T., Williams, J. S., & Shen, C.-L. (2007). The effect of acute exercise on serum brain-derived neurotrophic factor levels and cognitive function. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *39*(4), 728–734. <http://doi.org/10.1249/mss.0b013e31802f04c7>

Grego, F., Vallier, J. M., Collardeau, M., Rousseu, C., Cremieux, J., & Brisswalter, J. (2005). Influence of exercise duration and hydration status on cognitive function during prolonged cycling exercise. *International Journal of Sports Medicine*, *26*(1), 27–33. <http://doi.org/10.1055/s-2004-817915>

Griffin, É. W., Mullally, S., Foley, C., Warmington, S. a., O'Mara, S. M., Kelly, Á. M., ... Kelly, A. M. (2011). Aerobic exercise improves hippocampal function and increases BDNF in the serum of young adult males. *Physiology & Behavior*, *104*(5), 934–41. <http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2011.06.005>

Haywood, K. M., & Getchell, N. (2014). *Life span motor development 6th edition*. Human Kinetics.

Heinen, F., Fietzek, U. M., Berweck, S., & Hufschmidt, A. (1998). Fast Corticospinal System and Motor Performance in Children : Conduction Proceeds Skill, *8994*(98), 217–221.

Hillman, C. H., Erickson, K. I., & Kramer, A. A. F. (2008). Be smart, exercise your heart: exercise effects on brain and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, *9*(1), 58–65. Retrieved from <http://www.nature.com/nrn/journal/v9/n1/abs/nrn2298.html>

Hopkins, M. E., Davis, F. C., Vantighem, M. R., Whalen, P. J., & Bucci, D. J. (2012). Differential effects of acute and regular physical exercise on cognition and affect. *Neuroscience*, *215*, 59–68. <http://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2012.04.056>

Huang, V. S., Haith, A., Mazzoni, P., & Krakauer, J. W. (2011). Rethinking motor learning and savings in adaptation paradigms: model-free memory for successful actions combines with internal models. *Neuron*, *70*(4), 787–801. <http://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.04.012>

Jacobs, I. (1986). Blood Lactate. *Sports Medicine*, *3*(1), 10–25.

<http://doi.org/10.2165/00007256-198603010-00003>

Joundi, R. a, Lopez-Alonso, V., Lago, A., Brittain, J.-S., Fernandez-Del-Olmo, M., Gomez-Garre, P., ... Brown, P. (2012). The effect of BDNF val66met polymorphism on visuomotor adaptation. *Experimental Brain Research*, 223(1), 43–50. <http://doi.org/10.1007/s00221-012-3239-9>

Kagerer, F. a, Contreras-Vidal, J. L., Bo, J., & Clark, J. E. (2006). Abrupt, but not gradual visuomotor distortion facilitates adaptation in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, 25(4–5), 622–33. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2006.06.003>

Kantomaa, M. T., Stamatakis, E., Kankaanpää, A., Kaakinen, M., Rodriguez, A., Taanila, A., ... Tammelin, T. (2013). Physical activity and obesity mediate the association between childhood motor function and adolescents' academic achievement. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(5), 1917–22. <http://doi.org/10.1073/pnas.1214574110>

Khan, N. a, & Hillman, C. H. (2014). The relation of childhood physical activity and aerobic fitness to brain function and cognition: a review. *Pediatric Exercise Science*, 26(2), 138–46. <http://doi.org/10.1123/pes.2013-0125>

Knudsen, E. I. (2004). Sensitive periods in the development of the brain and behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 1412–1425. <http://doi.org/10.1162/0898929042304796>

Kowalski, K. C., Crocker, P. R. E., & Faulkner, R. A. (1997). Validation of the Physical Activity Questionnaire for Older Children. *Pediatric Exercise Science*, 9(12), 174–186. <http://doi.org/10.3967/bes2016.022>

Krakauer, J. W., Ghez, C., & Ghilardi, M. F. (2005). Adaptation to visuomotor transformations: consolidation, interference, and forgetting. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 25(2), 473–8. <http://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4218-04.2005>

Krakauer, J. W., & Mazzoni, P. (2011). Human sensorimotor learning: adaptation, skill, and beyond. *Current Opinion in Neurobiology*, 21(4), 636–644. <http://doi.org/10.1016/j.conb.2011.06.012>

Krakauer, J. W., & Shadmehr, R. (2006). Consolidation of motor memory. *Trends in*

- Neurosciences*, 29(1), 58–64. <http://doi.org/10.1016/j.tins.2005.10.003>
- Labban, J., & Etnier, J. (2011). Effects of acute exercise on long-term memory. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 82(4), 712–721. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02701367.2011.10599808>
- Labelle, V., Bosquet, L., Mekary, S., & Bherer, L. (2013). Decline in executive control during acute bouts of exercise as a function of exercise intensity and fitness level. *Brain and Cognition*, 81(1), 10–7. <http://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.10.001>
- Lahr, K., Elisabeth, S., Disorders, M., & Clinics, W. (2000). Development of the corticospinal system and hand motor function : central conduction times and motor performance tests, 220–227.
- Lambourne, K., & Tomporowski, P. D. (2010). The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: a meta-regression analysis. *Brain Research*, 1341, 12–24. <http://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.03.091>
- Latash, M. L. (2010). Stages in learning motor synergies: A view based on the equilibrium-point hypothesis. *Human Movement Science*, 29(5), 642–654. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2009.11.002>
- Léger, L. a, Mercier, D., Gadoury, C., & Lambert, J. (1988). The multistage 20 metre shuttle run test for aerobic fitness. *Journal of Sports Sciences*, 6(2), 93–101. <http://doi.org/10.1080/02640418808729800>
- Leveresen, J. S. R., Haga, M., & Sigmundsson, H. (2012). From children to adults: Motor performance across the life-span. *PLoS ONE*, 7(6). <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0038830>
- Lloyd, M., Saunders, T. J., Bremer, E., & Tremblay, M. S. (2014). Long-term importance of fundamental motor skills: A 20-year follow-up study. *Adapted Physical Activity Quarterly*, (August). <http://doi.org/10.1123/apaq.2013-0048>
- Lopes, L., Santos, R., Pereira, B., & Lopes, V. P. (2013). Associations between gross motor coordination and academic achievement in elementary school children. *Human Movement Science*, 32(1), 9–20. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2012.05.005>
- Lundbye-Jensen, J., Skriver, K., Nielsen, J. B., & Roig, M. (2017). Acute Exercise Improves Motor Memory Consolidation in Preadolescent Children. *Frontiers in Human Neuroscience*,

11(April), 1–10. <http://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00182>

Ma, J. K., Le Mare, L., & Gurd, B. J. (2014). Classroom-based high-intensity interval activity improves off-task behaviour in primary school students. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 39(12), 1332–1337. <http://doi.org/dx.doi.org/10.1139/apnm-2014-0125>

Magill, R. A., & Anderson, D. (2014). *Motor learning and control : concepts and applications* (10th ed). New York : McGraw-Hill. Retrieved from http://catalog.ub.edu/record=b2091819~S1*spl

Mahar, M. T., Murphy, S. K., Rowe, D. a., Golden, J., Shields, a. T., & Raedeke, T. D. (2006). Effects of a classroom-based program on physical activity and on-task behavior. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 38(12), 2086–2094. <http://doi.org/10.1249/01.mss.0000235359.16685.a3>

Mang, C. S., Brown, K. E., Neva, J. L., Snow, N. J., Campbell, K. L., & Boyd, L. A. (2016). Promoting Motor Cortical Plasticity with Acute Aerobic Exercise: A Role for Cerebellar Circuits. *Neural Plasticity*, 2016. <http://doi.org/10.1155/2016/6797928>

Mang, C. S., Snow, N. J., Campbell, K. L., Ross, C. J. D., & Boyd, L. A. (2014). A single bout of high-intensity aerobic exercise facilitates response to paired associative stimulation and promotes sequence-specific implicit motor learning. *Journal of Applied Physiology*, 117(11), 1325–36. <http://doi.org/10.1152/jappphysiol.00498.2014>

Mang, C. S., Snow, N. J., Wadden, K. P., Campbell, K. L., & Boyd, L. A. (2016). High-Intensity Aerobic Exercise Enhances Motor Memory Retrieval. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(12), 2477–2486. <http://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001040>

McMorris, T. (2016). Developing the catecholamines hypothesis for the acute exercise-cognition interaction in humans: Lessons from animal studies. *Physiology and Behavior*, 165, 291–299. <http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2016.08.011>

McMorris, T., & Hale, B. J. (2012). Differential effects of differing intensities of acute exercise on speed and accuracy of cognition: A meta-analytical investigation. *Brain and Cognition*, 80(3), 338–351. <http://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.09.001>

Miall, R. C., Jenkinson, N., & Kulkarni, K. (2004). Adaptation to rotated visual feedback: a re-examination of motor interference. *Experimental Brain Research*, 154(1999), 201–210.

<http://doi.org/10.1007/s00221-003-1630-2>

Miall, R. C., & Wolpert, D. M. (1996). Forward Models for Physiological Motor Control. *Neural Networks*, 9(8), 1265–1279. [http://doi.org/10.1016/S0893-6080\(96\)00035-4](http://doi.org/10.1016/S0893-6080(96)00035-4)

Neeper, S. a, Gómez-Pinilla, F., Choi, J., & Cotman, C. W. (1996). Physical activity increases mRNA for brain-derived neurotrophic factor and nerve growth factor in rat brain. *Brain Research*, 726(1–2), 49–56. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8836544>

Ostadan, F., Centeno, C., Daloz, J.-F., Frenn, M., Lundbye-Jensen, J., & Roig, M. (2016). Changes in corticospinal excitability during consolidation predict acute exercise-induced off-line gains in procedural memory. *Neurobiology of Learning and Memory*. <http://doi.org/10.1016/j.nlm.2016.10.009>

Pesce, C. (2012). Shifting the focus from quantitative to qualitative exercise characteristics in exercise and cognition research. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 34(6), 766–86. <http://doi.org/10.1016/j.mhpa.2009.02.001>

Pesce, C., & Ben-Soussan, T. D. (2016). “Cogito ergo sum” or “ambulo ergo sum”? New Perspectives in Developmental Exercise and Cognition Research. In T. McMorris (Ed.), *Exercise-Cognition Interaction: Neuroscience Perspectives* (pp. 251–282). London: Elsevier.

Pesce, C., Crova, C., Cereatti, L., Casella, R., & Bellucci, M. (2009). Physical activity and mental performance in preadolescents: Effects of acute exercise on free-recall memory. *Mental Health and Physical Activity*, 2(1), 16–22. <http://doi.org/10.1016/j.mhpa.2009.02.001>

Petzinger, G. M., Fisher, B. E., McEwen, S., Beeler, J. A., Walsh, J. P., & Jakowec, M. W. (2013). Exercise-enhanced neuroplasticity targeting motor and cognitive circuitry in Parkinson’s disease. *The Lancet Neurology*, 12(7), 716–726. [http://doi.org/10.1016/S1474-4422\(13\)70123-6](http://doi.org/10.1016/S1474-4422(13)70123-6)

Ploughman, M. (2008). Exercise is brain food: the effects of physical activity on cognitive function. *Developmental Neurorehabilitation*, 11(3), 236–40. <http://doi.org/10.1080/17518420801997007>

Ramnani, N. (2006). The primate cortico-cerebellar system: anatomy and function. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(7), 511–22. <http://doi.org/10.1038/nrn1953>

- Rhee, J., Chen, J., Riechman, S. M., Handa, A., Bhatia, S., & Wright, D. L. (2015). An acute bout of aerobic exercise can protect immediate offline motor sequence gains. *Psychological Research*. <http://doi.org/10.1007/s00426-015-0682-9>
- Robertson, E. M., Pascual-Leone, A., & Miall, R. C. (2004). Current concepts in procedural consolidation. *Nature Reviews. Neuroscience*, 5(7), 576–582. <http://doi.org/10.1038/nrn1426>
- Rohlf's Domínguez, P. (2014). Promoting our understanding of neural plasticity by exploring developmental plasticity in early and adult life. *Brain Research Bulletin*, 107, 31–36. <http://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2014.05.006>
- Roig, M., Nordbrandt, S., Geertsen, S. S., & Nielsen, J. B. (2013). The effects of cardiovascular exercise on human memory: A review with meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 37(8), 1645–1666. <http://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.06.012>
- Roig, M., Skriver, K., Lundbye-Jensen, J., Kiens, B., & Nielsen, J. B. (2012). A single bout of exercise improves motor memory. *PloS One*, 7(9), e44594. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0044594>
- Roig, M., Thomas, R., Mang, C. S., Snow, N. J., Ostadan, F., Boyd, L. A., & Lundbye-Jensen, J. (2016). Time-Dependent Effects of Cardiovascular Exercise on Memory. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 44(2), 81–88. <http://doi.org/10.1249/JES.0000000000000078>
- Salas, C. R., Minakata, K., & Kelemen, W. L. (2011). Walking before study enhances free recall but not judgement-of-learning magnitude. *Journal of Cognitive Psychology*, 23(4), 507–513. <http://doi.org/10.1080/20445911.2011.532207>
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2011). *Motor control and learning : a behavioral emphasis*. Human Kinetics.
- Scudder, M. R., Federmeier, K. D., Raine, L. B., Direito, A., Boyd, J. K., & Hillman, C. H. (2014). The association between aerobic fitness and language processing in children: Implications for academic achievement. *Brain and Cognition*, 87(1), 140–152. <http://doi.org/10.1016/j.bandc.2014.03.016>
- Segal, S., Cotman, C., & Cahill, L. (2012). Exercise-Induced Noradrenergic Activation Enhances Memory Consolidation in Both Normal Aging and Patients with Amnesic Mild Cognitive

- Impairment. *J Alzheimers Dis*, 32(4), 1011–1018. <http://doi.org/10.3233/JAD-2012-121078>
- Seidler, R. D., & Meehan, S. K. (2013). Introduction to the special topic: a multidisciplinary approach to motor learning and sensorimotor adaptation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7(September), 9–10. <http://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00543>
- Shadmehr, R., Smith, M. a, & Krakauer, J. W. (2010). Error correction, sensory prediction, and adaptation in motor control. *Annual Review of Neuroscience*, 33, 89–108. <http://doi.org/10.1146/annurev-neuro-060909-153135>
- Sibley, B. a, & Etnier, J. L. (2003). The Relationship Between Physical Activity and Cognition in Children : A Meta-Analysis. *Pediatric Exercise Science*, 15(3), 243–256. <http://doi.org/10.1515/ijsl.2000.143.183>
- Skriver, K., Roig, M., Lundbye-Jensen, J., Pingel, J., Helge, J. W., Kiens, B., & Nielsen, J. B. (2014). Acute exercise improves motor memory: Exploring potential biomarkers. *Neurobiology of Learning and Memory*, 116, 46–58. <http://doi.org/10.1016/j.nlm.2014.08.004>
- Smith, P. J., Blumenthal, J. a, Hoffman, B. M., Cooper, H., Strauman, T. a, Welsh-Bohmer, K., ... Sherwood, A. (2010). Aerobic exercise and neurocognitive performance: a meta-analytic review of randomized controlled trials. *Psychosomatic Medicine*, 72(3), 239–52. <http://doi.org/10.1097/PSY.0b013e3181d14633>
- Snow, N. J., Mang, C. S., Roig, M., McDonnell, M. N., Campbell, K. L., & Boyd, L. A. (2016). The Effect of an Acute Bout of Moderate-Intensity Aerobic Exercise on Motor Learning of a Continuous Tracking Task. *Plos One*, 11(2), e0150039. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0150039>
- Squire, L. R. (2004). Memory systems of the brain: A brief history and current perspective. *Neurobiology of Learning and Memory*, 82(3), 171–177. <http://doi.org/10.1016/j.nlm.2004.06.005>
- Squire, L. R., & Kandel, E. R. (2000). *Memory: From Mind to Molecules* (First ed.). New York: Scientific American Library. Retrieved from http://catalog.ub.edu/record=b1498919~S1*spi
- St-Louis-Deschênes, M., & Ellemberg, D. (2011). L'exercice physique aigu et la performance cognitive chez l'enfant et l'adolescent. *Science & Sports*, 28(2), 57–64.

<http://doi.org/10.1016/j.scispo.2011.10.007>

Statton, M. A., Encarnacion, M., Celnik, P., & Bastian, A. J. (2015). A Single Bout of Moderate Aerobic Exercise Improves Motor Skill Acquisition. *Plos One*, *10*(10), e0141393. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0141393>

Strauss, E., Spreen, O., & Sherman, E. M. S. (2006). *A Compendium of neuropsychological tests : administration, norms, and commentary*. Oxford [etc.]: Oxford University Press. Retrieved from http://catalog.ub.edu/record=b1901933~S1*spl

Tahej, P.-K. K., Ferrel-Chapus, C., Olivier, I., Ginhac, D., & Rolland, J.-P. P. (2012). Multiple representations and mechanisms for visuomotor adaptation in young children. *Human Movement Science*, *31*(6), 1425–1435. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2012.02.016>

Taubert, M., Villringer, A., & Lehmann, N. (2015). Endurance Exercise as an “Endogenous” Neuro-enhancement Strategy to Facilitate Motor Learning. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*(December), 1–16. <http://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00692>

Thomas, R., Beck, M. M., Lind, R. R., Korsgaard Johnsen, L., Geertsen, S. S., Christiansen, L., ... Lundbye-Jensen, J. (2016). Acute Exercise and Motor Memory Consolidation: The Role of Exercise Timing. *Neural Plasticity*, *2016*, 1–11. <http://doi.org/10.1155/2016/6205452>

Thomas, R., Flindtgaard, M., Skriver, K., Geertsen, S. S., Christiansen, L., Korsgaard Johnsen, L., ... Lundbye-Jensen, J. (2016). Acute exercise and motor memory consolidation: Does exercise type play a role? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. <http://doi.org/10.1111/sms.12791>

Thomas, R., Johnsen, L. K., Geertsen, S. S., Christiansen, L., Ritz, C., Roig, M., & Lundbye-Jensen, J. (2016). Acute Exercise and Motor Memory Consolidation: The Role of Exercise Intensity. *PLOS ONE*, *11*(7), e0159589. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0159589>

Tomporowski, P. D. (2003). Effects of acute bouts of exercise on cognition. *Acta Psychologica*, *112*, 297–324.

Tomporowski, P. D., Lambourne, K., & Okumura, M. S. (2011). Physical activity interventions and children’s mental function: an introduction and overview. *Preventive Medicine*, *52 Suppl 1*, S3-9. <http://doi.org/10.1016/j.ypmed.2011.01.028>

Tomporowski, P. D., McCullick, B., Pendleton, D. M., & Pesce, C. (2015). Exercise and children’s cognition: The role of exercise characteristics and a place for metacognition. *Journal of*

Sport and Health Science, 4(1), 47–55. <http://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.09.003>

Tomporowski, P. D., McCullick, B., & Pesce, C. (2015). *Enhancing children's cognition with physical activity games*. Human Kinetics.

Trempe, M., & Proteau, L. (2010). Distinct consolidation outcomes in a visuomotor adaptation task: Off-line leaning and persistent after-effect. *Brain and Cognition*, 73(2), 135–45. <http://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.04.005>

Trempe, M., Sabourin, M., & Proteau, L. (2012). Success modulates consolidation of a visuomotor adaptation task. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 38(1), 52–60. <http://doi.org/10.1037/a0024883>

Trudeau, F. F., & Shephard, R. J. (2008). Physical education, school physical activity, school sports and academic performance. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 10, 1–10. <http://doi.org/10.1186/1479-Received>

Udupa, K., & Chen, R. (2013). *Central motor conduction time*. *Handbook of Clinical Neurology* (1st ed., Vol. 116). Elsevier B.V. <http://doi.org/10.1016/B978-0-444-53497-2.00031-0>

van Praag, H., Christie, B. R., Sejnowski, T. J., & Gage, F. H. (1999a). Running enhances neurogenesis, learning, and long-term potentiation in mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(23), 13427–13431. <http://doi.org/10.1073/pnas.96.23.13427>

van Praag, H., Christie, B. R., Sejnowski, T. J., & Gage, F. H. (1999b). Running enhances neurogenesis, learning, and long-term potentiation in mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(23), 13427–31. Retrieved from <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=23964&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>

van Praag, H., Shubert, T., Zhao, C., & Gage, F. H. (2005a). Exercise enhances learning and hippocampal neurogenesis in aged mice. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 25(38), 8680–8685. <http://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1731-05.2005>

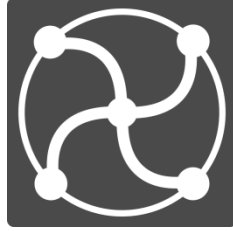
van Praag, H., Shubert, T., Zhao, C., & Gage, F. H. (2005b). Exercise enhances learning and hippocampal neurogenesis in aged mice. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 25(38), 8680–5.

<http://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1731-05.2005>

- Vasudevan, E. V. L., Torres-Oviedo, G., Morton, S. M., Yang, J. F., & Bastian, A. J. (2011). Younger Is Not Always Better: Development of Locomotor Adaptation from Childhood to Adulthood. *Journal of Neuroscience*, *31*(8), 3055–3065. <http://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5781-10.2011>
- Vaynman, S., & Gomez-Pinilla, F. (2006). Review Revenge of the “Sit” : How Lifestyle Impacts Neuronal and Cognitive Health Through Molecular Systems That Interface Energy Metabolism With Neuronal Plasticity, *715*(April), 699–715. <http://doi.org/10.1002/jnr>
- Vaynman, S., Ying, Z., & Gomez-Pinilla, F. (2004). Hippocampal BDNF mediates the efficacy of exercise on synaptic plasticity and cognition. *The European Journal of Neuroscience*, *20*(10), 2580–90. <http://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2004.03720.x>
- Visser, J. (2003). Developmental coordination disorder: a review of research on subtypes and comorbidities. *Human Movement Science*, *22*(4–5), 479–493. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2003.09.005>
- Voss, M. W., Nagamatsu, L. S., Liu-Ambrose, T., & Kramer, A. F. (2011). Exercise, brain, and cognition across the life span. *Journal of Applied Physiology*, *111*(5), 1505–1513. <http://doi.org/10.1152/jappphysiol.00210.2011>
- White, E. J., Hutka, S. A., Williams, L. J., & Moreno, S. (2013). Learning, neural plasticity and sensitive periods: implications for language acquisition, music training and transfer across the lifespan. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *7*(November), 90. <http://doi.org/10.3389/fnsys.2013.00090>
- Wigal, S. B., Nemet, D., Swanson, J. M., Regino, R., Trampush, J., Ziegler, M. G., & Cooper, D. M. (2003). Catecholamine response to exercise in children with attention deficit hyperactivity disorder. *Pediatric Research*, *53*(5), 756–761. <http://doi.org/10.1203/01.PDR.0000061750.71168.23>
- Winter, B., Breitenstein, C., Mooren, F. C., Voelker, K., Fobker, M., Lechtermann, A., ... Knecht, S. (2007). High impact running improves learning. *Neurobiology of Learning and Memory*, *87*(4), 597–609. <http://doi.org/10.1016/j.nlm.2006.11.003>
- Ziemann, U., Iliac, T. V., Pauli, C., Meintzschel, F., & Ruge, D. (2004). Learning Modifies Subsequent Induction of Long-Term Potentiation-Like and Long-Term Depression-Like

Plasticity in Human Motor Cortex. *Journal of Neuroscience*, 24(7), 1666–1672.
<http://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5016-03.2004>

ANEXOS



RESEARCH ARTICLE

Enhancing consolidation of a rotational visuomotor adaptation task through acute exercise

Blai Ferrer-Uris¹, Albert Busquets¹, Virginia Lopez-Alonso², Miguel Fernandez-del-Olmo², Rosa Angulo-Barroso^{1,3*}

1 Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya, University of Barcelona, Barcelona, Spain, **2** Facultade de Ciencias do Deporte e a Educación Física (INEF Galicia), University of A Coruña, A Coruña, Spain, **3** Kinesiology, California State University, Northridge, Northridge CA, United States of America

* rangulo@umich.edu



Abstract

We assessed the effect of a single bout of intense exercise on the adaptation and consolidation of a rotational visuomotor task, together with the effect of the order of exercise presentation relative to the learning task. Healthy adult participants ($n = 29$) were randomly allocated to one of three experimental groups: (1) exercise before task practice, (2) exercise after task practice, and (3) task practice only. After familiarization with the learning task, participants undertook a baseline practice set. Then, four 60° clockwise rotational sets were performed, comprising an adaptation set and three retention sets at 1 h, 24 h, and 7 days after the adaptation set. Depending on the experimental group, exercise was presented before or after the adaptation sets. We found that error reduction during adaptation was similar regardless of when exercise was presented. During retention, significant error reduction was found in the retention set at 1 h for both exercise groups, but this enhancement was not present during subsequent retention sets, with no differences present between exercise groups. We conclude that an acute bout of intense exercise could positively affect retention, although the order in which exercise is presented does not appear to influence its benefits during the early stages of consolidation.

OPEN ACCESS

Citation: Ferrer-Uris B, Busquets A, Lopez-Alonso V, Fernandez-del-Olmo M, Angulo-Barroso R (2017) Enhancing consolidation of a rotational visuomotor adaptation task through acute exercise. *PLoS ONE* 12(4): e0175296. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175296>

Editor: Andreas Mierau, German Sport University, GERMANY

Received: September 5, 2016

Accepted: March 23, 2017

Published: April 13, 2017

Copyright: © 2017 Ferrer-Uris et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All files are available from the figshare database (doi: [10.6084/m9.figshare.3806499](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.3806499)).

Funding: This study was supported by Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (AGAUR) (PRE/2623/2013), both from Generalitat de Catalunya, and Grup de Recerca en Activitat Física i Salut (GRAFIS, 2014SGR/1629). The funders had no role in study design, data collection

Introduction

Humans learn and relearn numerous skills throughout their lives. Learning, along with brain function, is known to be influenced by many factors, including engagement in physical activity and a healthy lifestyle [1]. Physical activity, in particular, has been shown to have a positive impact on brain function and cognition [2], with supportive evidence coming from both animal and human studies [1,3–9]. In a recent review, aerobic exercise training programs were shown to improve attention and processing speed, executive function, and memory [10]. However, these benefits seem to depend on characteristics of the exercise, including its mode, intensity, and duration [11]. More specifically, the benefits of exercise are aroused not only by training

and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

programs but also by acute bouts of exercise [8]. The evidence suggests that an acute bout of exercise can selectively improve various cognitive processes and enhance memory [11–14].

Despite the growing knowledge base concerning how exercise influences cognitive function, research is scarce regarding how exercise affects specific types of memory. Long-term memory formation requires a two-step process: first, the acquisition (adaptation) of sensory information that will be stored as short-term (working) memory (lasting from seconds to 1–2 minutes) [15]; and second, the consolidation of such memory so it becomes more stable and resistant to perturbation [16,17]. Long-term memory can be split into declarative and non-declarative memory, with the latter being more relevant to learning motor skills [18]. To our knowledge, the following articles have explored the effects of an acute exercise intervention on adaptation and retention of this concrete type of memory. Typically, motor memory consolidation is assessed via retention tests and therefore both terms are used interchangeably in the literature [19].

Statton et al. [20] showed how a moderate-intensity running bout enhanced motor adaptation on the sequential visual isometric pinch task. However, adaptation enhancement did not lead to better retention of the motor skill. Roig et al. [21] studied how an intense acute bout of exercise (cycling) could improve motor adaptation and consolidation of a manual tracking task. Although it did not improve adaptation, exercise had a positive effect on mid-term (24 h) and long-term (7 days) skill retention. Moreover, they found that the presentation order of the exercise in relation to the learning task affected the outcome, with participants who exercised immediately after a learning task showing superior long-term skill retention compared with participants who exercised immediately before. Preceded by Roig's study, Mang et al. [22] observed that a single bout of intense cycling presented before a sequence-specific motor learning task (continuous tracking) enhanced adaptation and mid-term retention (24 h). Additionally, in a posterior study, the same authors observed that an equal exercise bout improved relearning of a discrete motor sequence task 24 h after adaptation [23]. Overall, Mang's results suggest that intense exercise could strengthen the adaptation and retention of the motor skill.

The previously cited studies utilized tasks that required some form of motor adaptation while also including [20,22] or not [21] learning of an implicit sequence. Unfortunately, Roig's and Mang's studies used similar learning paradigms which limits their generalizability to other procedural learning situations. Moreover, when including the research of Statton et al. (2015), the motor tasks in these studies only required pinch, wrist, or thumb movements in a single direction (e.g. left–right). More complex motor learning paradigms, involving multi-joint and multi-plane movements, are needed to expand our understanding of how exercise can affect the learning process of other gross motor skills. Also, it is unclear how exercise characteristics moderate the exercise effects on adaptation and retention of motor skills. Consequently, a different exercise protocol and learning task is necessary to clarify the extent of exercise-induced benefits on cognitive processes and memory. Lastly, because of the limited evidence regarding the effect of the exercise presentation order in relation to the learning task [21], further research is needed to clarify what presentation order is best to enhance motor learning.

Here, we investigated the effect of running as an acute intense exercise (iE) on the adaptation and retention of a rotational visuomotor adaptation task (rVMA). In addition, we examined the effect of the presentation order of the iE in relation to the rVMA task on retention. We hypothesized that (1) iE would improve the learning rate when presented immediately before the adaptation process of the rVMA task; and (2) iE would improve the rVMA retention process in the short- (1 h), mid- (24 h) or long- (7 days) term. Additionally, we also aimed to explore the effect of the presentation order of the iE and the rVMA task to observe if presentation order may lead to differences on long-term retention.

Materials and methods

Participants

In total, 29 adults participated in this study, of whom 21 were males and 8 were females (7 male participants in each group); their mean age, height, and body mass was 21.2 ± 1.9 years, 169 ± 10 cm, and 64.0 ± 80.8 kg, respectively (see Table 1 for participants' background characteristics). Participants had no prior experience with the proposed learning task (i.e., the rVMA). The exclusion criteria for participation were selected in part to ensure compliance with the exercise protocol and the learning task: left-handedness; low engagement in physical activity; a body mass index above 30 kg/m^2 ; below-average intelligence; a self-reported history of neurological, psychiatric, or physical impairment; uncorrected vision worse than 20/20; current medication or recreational drug use that may affect the nervous system or the ability to learn; and smoking. Participants were randomly assigned to one of three groups based on the relationship between the rVMA task and iE: (1) rVMA after exercise (EX-rVMA); (2) rVMA before the exercise (rVMA-EX); and (3) rVMA only (CON). Randomization was checked to ensure in age and fitness level among the three groups, as these factors have been reported to affect how acute exercise alters cognitive performance [24].

The study was approved by the Clinical Research Ethical Committee of the Catalan Sport Administration. All participants provided written consent before the study commenced.

The rVMA task

The rVMA was conducted in a quiet room. Participants were seated in front of a 19-inch computer screen on which the task was presented. The screen was adjusted to eye level and sited at a distance of 1 meter. Participants' right arms were then rested over a height-adjustable flat surface to maintain 90° elbow flexion and a comfortable shoulder position. Participants were asked to grasp a non-isometric joystick with their right hand to control a green dot measuring 1×1 cm. They were instructed to use a claw-like grip, and to maintain this across all trials (see Fig 1 for a detailed overview of the rVMA setup). An NI USB-6008 card (National Instruments)

Table 1. Group characteristics.

	EX_rVMA	rVMA_EX	CON
n	10	10	9
Sex (male/female)	7/3	7/3	7/2
Age (years)	20.9 ± 1.8	20.5 ± 1.8	22.1 ± 1.7
Height (cm)	172.0 ± 12.8	168.7 ± 9.1	168.8 ± 7.9
Body mass (kg)	64.7 ± 11.1	63.8 ± 9.5	63.4 ± 5.6
BMI (kg/m ²)	21.7 ± 1.4	22.3 ± 1.8	22.3 ± 2.1
TONI-2-IQ	121.4 ± 6.8	121.3 ± 6.4	125.6 ± 6.4
Estimated VO ₂ max (ml/kg/min)	56.9 ± 3.6	55.2 ± 5.5	52.3 ± 8.1
20mSRT HR (bpm)	186.1 ± 9.3	188.1 ± 10.4	186.2 ± 9.7
iE estimated 85% VO ₂ max HR (bpm)	182.9 ± 11.4	185.9 ± 12.6	-
iE_estimated 60% VO ₂ max HR (bpm)	161.2 ± 14.4	166.4 ± 13.8	-

Abbreviations: BMI = Body mass index; CON = no-exercise group; EX-rVMA = rVMA after exercise group; rVMA = rotational visuomotor adaptation task; rVMA-EX = rVMA before exercise group; TONI-2-IQ = Test of Nonverbal Intelligence version 2– Intellectual quotient; estimated VO₂max = estimated maximal oxygen uptake; 20mSRT = 20 meter Shuttle Run Test; HR = Heart Rate; iE = intense Exercise. HR during the 20mSRT was calculated as the mean±SD of the last completed minute. HR during the iE was calculated as mean±SD during the last 30 seconds of each estimated 85% or 60% VO₂max intensity interval.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175296.t001>

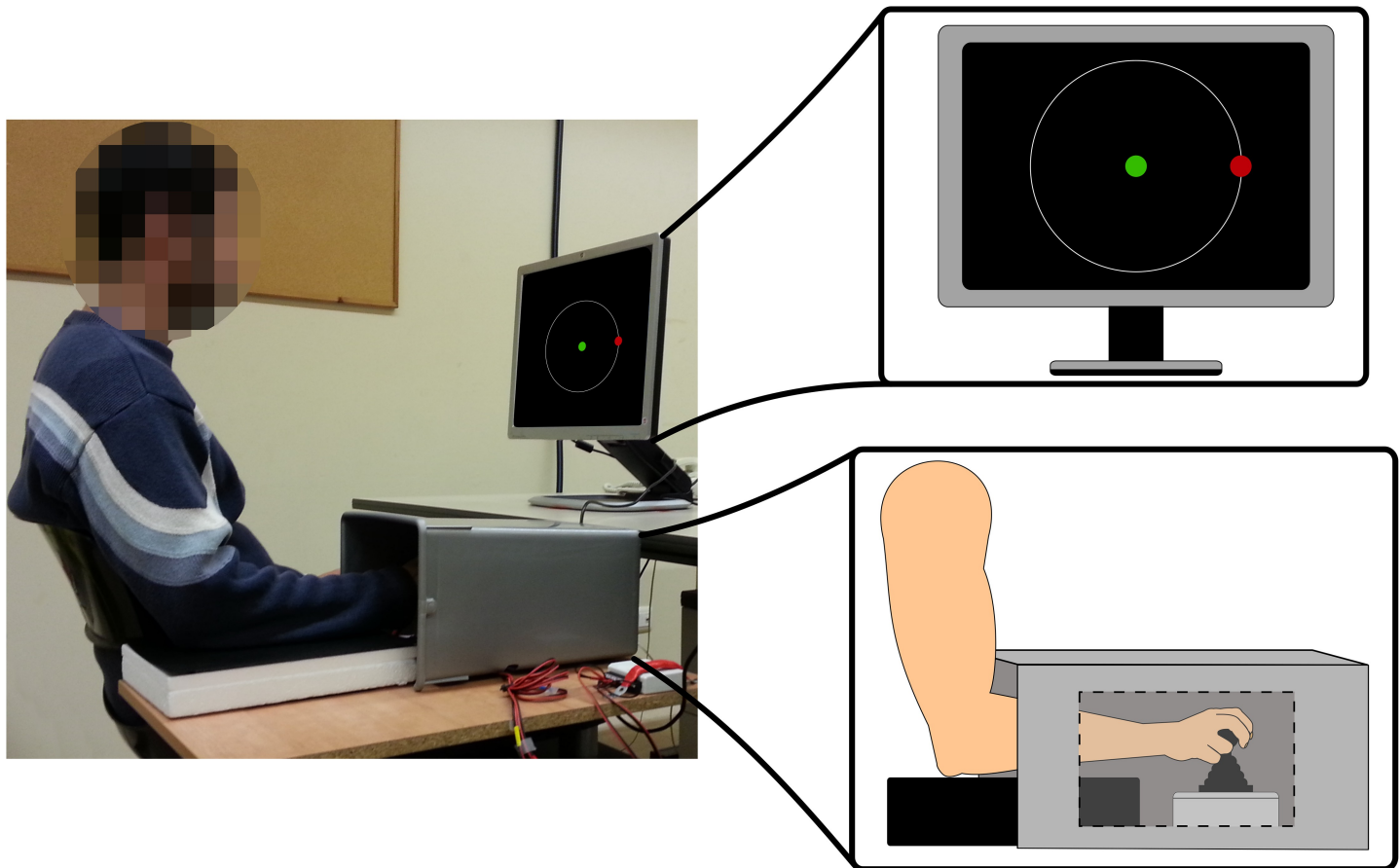


Fig 1. The rotational visuomotor adaptation task (rVMA). Illustration of the setup for the rotational visuomotor adaptation task (rVMA).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175296.g001>

registered the x, y cartesian coordinates and their corresponding time-points of the joystick movements at a frequency of 120 Hz. Targets randomly appeared every 2 s as red dots (1×1 cm) in eight different locations (45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° , and 360° , in reference to the vertical midline) at a radius of 13 cm from the center. Each target remained visible for 750 ms. Participants were instructed to start from the center and were encouraged to move the green dot over the target (red dot) and back to the center as fast and as straight as possible in a single movement.

The iE bout

The acute bout of iE consisted of a 13-min 20-m shuttle run combining a fast and slow speed based on a percentage of the estimated VO_{2max} (see *Procedure*): the fast speed corresponded to 85% of the estimated VO_{2max} , and the slow speed corresponded to 60% of the estimated VO_{2max} . The iE proceeded as follows: 3 min fast + 2 min slow + 3 min fast + 2 min slow + 3 min fast. Exercise protocols of similar intensity have been previously used [21,22] and high intensity interval exercise has recently found to enhance motor learning [25]. Before starting the iE, a 3-min warm-up session was completed (a 2-min slow run and 1-min fast run) to familiarize participants with the iE speeds. A 5-min rest and free stretch period was also permitted before starting the iE. In the case of participants in the EX-rVMA and the rVMA-EX groups, the transition time between the iE and the rVMA was 4 min. We also recorded the

participants' beat-by-beat values for the intervals between electrocardiogram R waves (RR intervals) during the exercise using a Polar RS800CX (Polar Electro) at a frequency of 1 KHz to monitor the exercise intensity. Calculated mean and SD for the heart rate (HR) values of the last 30 seconds of each speed interval are presented in [Table 1](#).

Procedure

Four sessions were conducted for each participant ([Fig 2](#)).

In session 2, after the rVMA task baseline sets, participants were divided into three groups based on the order of rVMA presentation and whether iE was used. *Abbreviations:* CON = no-exercise group; EX-rVMA = rVMA after exercise group; iE = intense exercise; IDE = initial directional error; RL = Rate of learning; RMSE = root mean squared error; rVMA = rotational visuomotor adaptation task; rVMA-EX = rVMA before exercise group.

In the first session, we reviewed whether the participant met any of the exclusion criteria and assessed their fitness level. Participants were asked to answer a self-report questionnaire related to the exclusion criteria, which included the Physical Activity Readiness Questionnaire

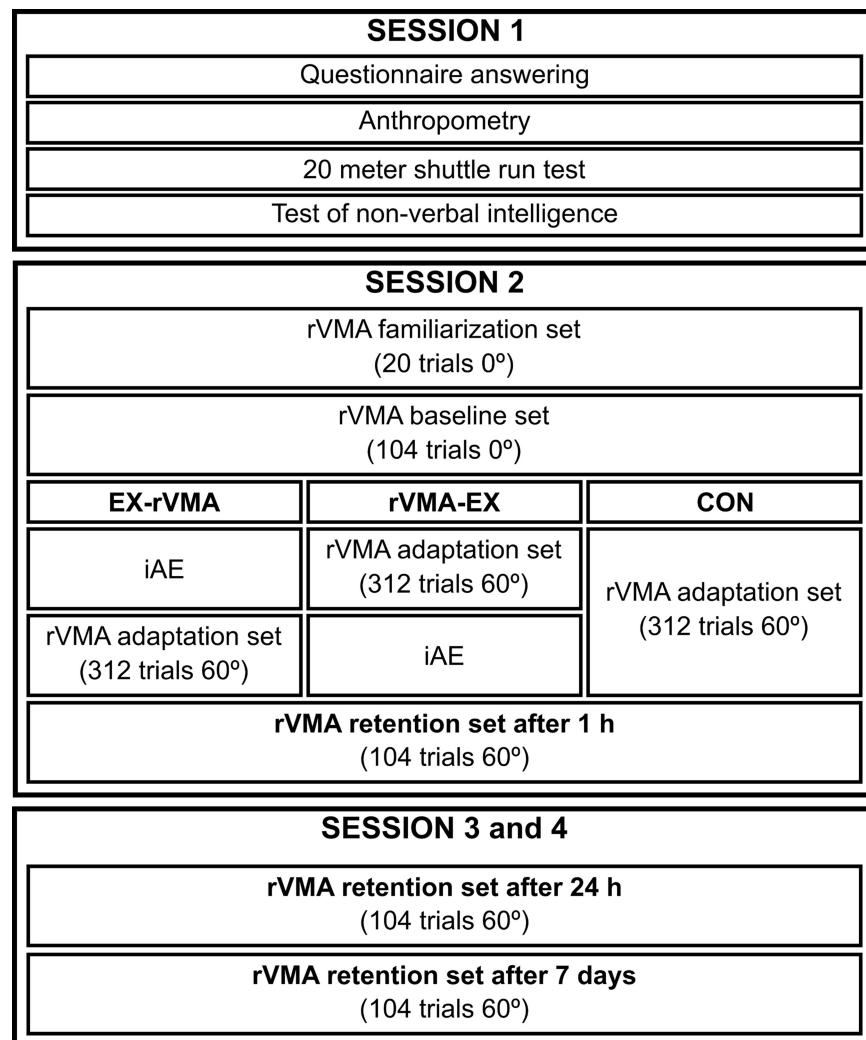


Fig 2. Schematic overview of the experimental procedure.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175296.g002>

Early Adaptation

Late Adaptation



Fig 3. Early and late rVMA cursor trajectories during the adaptation set. The first and last 32 trials of a random participant are shown in the figure. A color has been assigned to each target and its corresponding trajectories to facilitate reading. Greater deviations from the target can be observed during the early adaptation in comparison to the late adaptation. During the test, all targets were presented as red dots.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175296.g003>

(PAR-Q) to assess health status, and the International Physical Activity Questionnaire short version (IPAQ) to assess engagement in physical activity. Basic anthropometry measures (height and body mass) were taken. To assess fitness level (estimated VO_2max), participants did a 20-m shuttle run test (20mSRT) [26]. During the 20mSRT, beat-by-beat RR values were recorded using a Polar RS800CX (Polar Electro) at a 1 KHz frequency. At the end of the first session, participants undertook the Test of Nonverbal Intelligence version 2 (TONI-2) to assess their intelligence level (TONI-2 Intelligence quotient, TONI-2-IQ). Between the first and the second session, participants were allowed to rest for at least 48 h.

In the second session, all participants performed the rVMA task, but only the experimental groups performed the exercise protocol. The session started with a familiarization set (20 trials) of non-registered practice in the rVMA task without rotation (0°). When the familiarization set ended, the baseline set was done without rotation (0° ; 104 trials). Next, participants did an adaptation set (312 trials) in the rVMA task, with a clockwise rotation of 60° applied to the cardinal coordinates of the cursor movement. Because of this rotation, movements of the hand and joystick appeared on the screen with a clockwise deviation of 60° . An example of the early and late trajectories of the cursor movement during the adaptation set is presented in Fig 3. At this point, the procedure was defined by the participant's group. The exercise groups did a 13-min iE session before (EX-rVMA group) or after (rVMA-EX group) the adaptation set. Mirroring the rVMA-EX group, the CON group did the adaptation set immediately after the baseline set, but without doing any exercise after completing the adaptation; only reading or holding a conversation was allowed. At 1 hour after the adaptation set, all participants did a

60° clockwise retention set (i.e., the RT1h; 104 trials). During this second session, participants were not allowed to listen to music, do any supplementary exercise, or to sleep.

Sessions three and four were held 24 hours and 7 days after the second session to assess mid- and long-term rVMA retentions, respectively. A 60° clockwise retention set (104 trials) was done in each session (RT24h and RT7d, respectively).

Data reduction

Custom-made MATLAB R2014b programs (The MathWorks) were used to fit and reduce data. Cartesian positions were low-pass filtered using an eighth-order dual-pass Butterworth filter (cut-off frequency: 12 Hz). Only trials where the start was initially found within 20% of the center-to-target distance were accepted. Movement onset was defined as the nearest point to an outward movement equal to 10% of the center-to-target distance. The movement offset was defined as the point where the speed decreased to 10% of the maximum speed. In addition, we rejected trials in which the traveled distance did not reach 90% of the center-to-target distance. Overall, a total of 110 trials were rejected, which represents a 0.52% of the total executed trials. There were no group differences in the number of trials used for further analyses (Kruskal-Wallis One-Way ANOVA, $p = 0.478$). Finally, all rVMA sets were divided into epochs of eight trials each for analysis purposes.

Variables

As descriptive variables of movement, we calculated the movement time (MT, ms), the travel distance (TD, cm), and the reaction time (RT, ms), which was defined as the time between target appearance and movement onset. The following movement output error variables were calculated, as presented in previous research [27]: absolute angular initial directional error (IDE, degrees) and root mean squared error (RMSE, cm). IDE was calculated as the difference between the ideal trajectory, defined by the vector between the center point to the target, and the real trajectory, defined by the vector between the center point to the trajectory point at 80 ms after the movement onset. The 80 ms time point was selected to avoid possible corrections guided by visual feedback. RMSE, as straightness measure of the entire movement was calculated, considering the real joystick trajectory and the ideal trajectory (characterized by a straight line), as follows:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2] \frac{1}{N}}$$

where (x_1, y_1) and (x_2, y_2) are the coordinates of the real and ideal trajectory, respectively, and N is the number of points in the path.

As seen in other studies [28], we observed an initial rapid change in the error reduction rate followed by a slower decline during the adaptation set. We found that these data were best fitted by a double-exponential decay function of the form:

$$y = a * e^{b*x} - c * e^{d*x}$$

where y is the error, x is the epoch number and a , b , c , and d are parameters.

To capture the initial rate of learning (RL), we computed the first derivative of the first half of the function and evaluated it at epoch 1, similarly to the method described by Coats et al. [29], for both IDE (RL-IDE) and RMSE (RL-RMSE). All individual correlations were visually inspected for a plateau suggesting that learning was achieved and all correlation values were above 0.8 (RL-IDE $r = 0.81-0.98$; RL-RMSE $r = 0.87-0.99$).

Data analysis

The assumption of normality was explored with the Shapiro–Wilk test for all variables. As appropriate, variables were transformed or subject to alternative non-parametric tests when the assumption of normality failed. Similarities in age and fitness level (estimated VO_2max) among groups were explored by one-way analysis of variance (ANOVA). To ensure that the rVMA baseline performance was similar across the three groups, we compared the mean value for each variable (MT, TD, RT, IDE, and RMSE) using ANOVA. The statistical significance was set at $p < 0.05$ for all comparisons.

To address the first hypothesis, Student's t -tests were conducted to analyze the effect of the iE on the average performance of the motor skill adaptation (MT, TD, RT, IDE, and RMSE), comparing those participants who exercised before the rVMA task (i.e. EX-rVMA group [exercise cohort]) to those who did not (i.e. rVMA-EX + CON groups [no-exercise cohort]). When unequal variances were found, Welch's t test correction was used. We also evaluated the differences between the exercise and the no-exercise cohorts in the rate of learning of the motor skill (i.e., the RL-IDE and RL-RMSE) by using the Mann–Whitney U test. In addition, to examine the relation between the degree of learning at 1 h and the adaptation set of both error variables (IDE and RMSE), we used the Pearson correlation coefficient between the end of the adaptation (average of last 4 epochs, 32 trials) and the start of the RT1h (average of first 4 epochs, 32 trials).

Regarding the second hypotheses and the aim to explore the effect of the presentation order of exercise and the learning task, averages were calculated for each variable (MT, TD, RT, IDE, and RMSE) and each rVMA retention set. Differences in the averaged retentions of the motor skill were analyzed by two-way (group \times set) repeated-measures ANOVA, with Greenhouse–Geisser sphericity-corrected values reported when appropriate. Where a significant difference occurred, Bonferroni *post hoc* analyses were performed.

Finally, the effect sizes for the different tests were calculated according to Cohen's criteria [30]: d was used for t -tests (0.2, 0.5, and 0.8 for small, medium and large effects, respectively); r for the Mann–Whitney U test (0.1, 0.3, and 0.5 for small, medium and large effects, respectively); and η^2p for ANOVAs (0.01, 0.06, and 0.14 for small, medium, and large effects respectively).

Results

Age and fitness level (assessed by the estimated maximal oxygen uptake [VO_2max]) along with descriptive and error variables for the rVMA during the baseline set were explored to ensure that there were no baseline differences among groups. Age ($F_{(2, 26)} = 2.120$; $p = 0.140$; $\eta^2p = 0.140$) and estimated VO_2max ($F_{(2, 26)} = 1.433$; $p = 0.257$; $\eta^2p = 0.099$) parameters revealed no group differences (see Table 1 for means and standard deviation [SD]). Baseline set analysis showed similar rVMA descriptive values among the groups for MT ($F_{(2, 26)} = 0.098$; $p = 0.907$; $\eta^2p = 0.007$), TD ($F_{(2, 26)} = 0.320$; $p = 0.729$; $\eta^2p = 0.059$), and RT ($F_{(2, 26)} = 1.677$; $p = 0.207$; $\eta^2p = 0.114$). In addition, there were no group differences for the error variables, neither for the IDE ($F_{(2, 26)} = 0.820$; $p = 0.451$; $\eta^2p = 0.059$) nor for the RMSE ($F_{(2, 26)} = 0.253$; $p = 0.778$; $\eta^2p = 0.019$) (see Table 2 for means and SD). These results suggested that the randomization procedure was effective in balancing the groups, and that the movement performances were comparable across the three groups in the baseline set of the rVMA task.

In the adaptation set we evaluated the impact of iE on the averaged descriptive and error variables, and on the initial error reduction on RL (Table 2). The t -tests showed similar results between those who exercised before the rVMA (exercise cohort) and those who did not (no-exercise cohort) for MT ($t_{(27)} = -0.579$; $p = 0.568$; $d = 0.199$), TD ($t_{(27)} = -0.695$; $p = 0.493$;

Table 2. Mean and SD performance values on the rotational visuomotor adaptation task (rVMA) for each group and set.

	EX-rVMA	rVMA-EX	CON
Baseline			
MT (ms)	144.49 ± 17.6	143.04 ± 36.0	149.19 ± 37.5
TD (cm)	7.42 ± 0.3	7.49 ± 0.4	7.56 ± 0.4
RT (ms)	346.50 ± 24.2	329.74 ± 17.8	340.37 ± 19.3
IDE (deg)	5.08 ± 1.0	5.79 ± 1.9	5.30 ± 0.5
RMSE (cm)	0.79 ± 0.0	0.81 ± 0.0	0.80 ± 0.1
Adaptation			
MT (ms)	154.63 ± 16.6	155.20 ± 37.8	172.01 ± 49.8
TD (cm)	7.43 ± 0.3	7.52 ± 0.4	7.53 ± 0.4
RT (ms)	343.64 ± 37.5	348.97 ± 18.9	350.25 ± 30.3
IDE (deg)	16.07 ± 3.0	14.89 ± 3.0	18.42 ± 3.1
RL-IDE	-11.66 ± 6.1	-12.40 ± 8.3	-11.02 ± 7.9
RMSE (cm)	1.55 ± 0.2	1.45 ± 0.2	1.68 ± 0.3
RL-RMSE	-0.99 ± 0.6	-0.99 ± 0.8	-5.47 ± 13.0
Retention 1h			
MT (ms)	148.02 ± 18.2	139.07 ± 25.9	161.71 ± 48.1
TD (cm)	7.37 ± 0.3	7.45 ± 0.4	7.53 ± 0.9
RT (ms)	350.99 ± 33.7	344.03 ± 24.1	346.66 ± 35.4
IDE (deg)	9.70 ± 1.4	9.43 ± 2.2	12.53 ± 2.3
RMSE (cm)	1.08 ± 0.1	1.08 ± 0.2	1.24 ± 0.3
Retention 24h			
MT (ms)	148.13 ± 16.3	136.41 ± 28.9	153.58 ± 43.5
TD (cm)	7.60 ± 0.3	7.92 ± 0.4	7.81 ± 0.6
RT (ms)	341.62 ± 29.5	336.62 ± 24.3	335.11 ± 28.3
IDE (deg)	11.66 ± 2.3	11.92 ± 2.2	12.39 ± 2.2
RMSE (cm)	1.27 ± 0.1	1.31 ± 0.2	1.31 ± 0.3
Retention 7 days			
MT (ms)	143.46 ± 23.1	138.96 ± 29.8	148.73 ± 41.3
TD (cm)	7.68 ± 0.4	7.85 ± 0.4	7.61 ± 0.4
RT (ms)	338.62 ± 29.2	334.70 ± 23.3	331.26 ± 26.4
IDE (deg)	10.83 ± 2.0	11.56 ± 2.6	11.12 ± 2.3
RMSE (cm)	1.20 ± 0.1	1.28 ± 0.2	1.20 ± 0.2

EX-rVMA = rVMA after exercise group; rVMA-EX = rVMA before exercise group; CON = no-exercise group; MT = movement time; TD = travel distance; RT = reaction time; IDE = initial directional error; RMSE = root mean squared error; RL = rate of learning.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175296.t002>

$d = 0.283$), and RT ($t_{(27)} = -0.631$; $p = 0.533$; $d = 0.229$). Means and SDs for the no-exercise cohort were: 163.16 ± 43.49 ms for MT, 7.53 ± 0.39 cm for TD, and 349.57 ± 24.24 ms for RT (see EX-rVMA group values in Table 2). Comparison of the averaged errors also revealed similar performance between cohorts for the IDE ($t_{(27)} = -0.385$; $p = 0.703$; $d = 0.154$) and the RMSE ($t_{(27)} = -0.102$; $p = 0.919$; $d = 0.043$) with means in the no-exercise cohort of $16.56^\circ \pm 3.45^\circ$ and 1.56 ± 0.29 cm for IDE and RMSE respectively. Similarly, the Mann-Whitney U test showed comparable cohort results regarding the rate of learning for RL-IDE (exercise cohort median = -12.26° ; no-exercise cohort median = -10.83° ; $U = 88$; $p = 0.748$; $r = 0.05$) and RL-RMSE (exercise cohort median = -0.92 cm, no-exercise cohort median = -0.78 cm; $U = 82$; $p = 0.551$; $r = 0.11$) (Fig 4). These data mean that all participants adapted at a similar rate. Furthermore, taking together, all participants showed that performance at the end of the

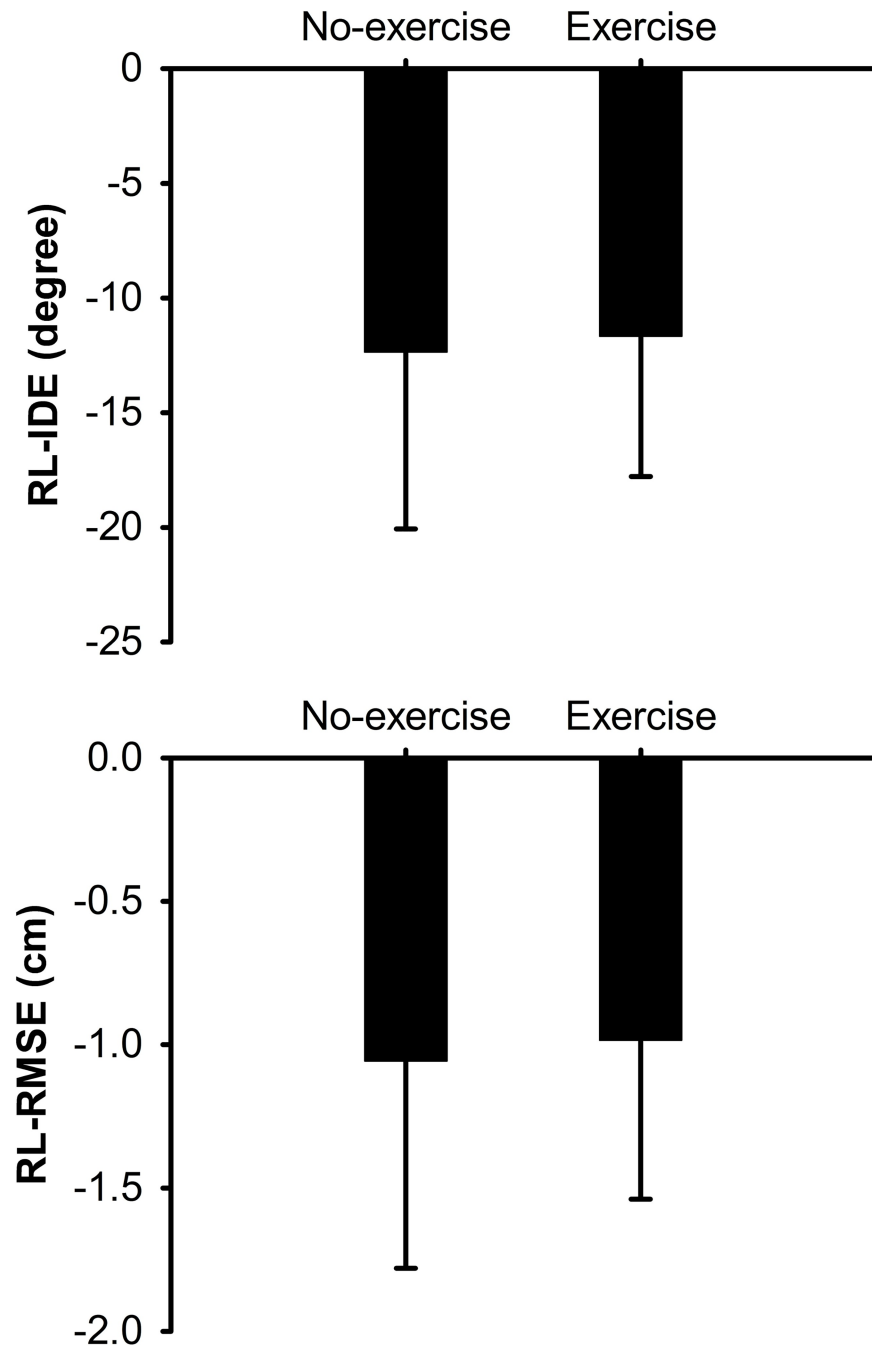


Fig 4. Comparison of the RL for the rVMA during the adaptation set between participants who did and did not perform exercise before the rVMA. RL was calculated for the error variables IDE and RMSE and expressed by mean and SD. *Abbreviations:* IDE = initial directional error; RL = Rate of learning; RMSE = root mean squared error; rVMA = rotational visuomotor adaptation task.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175296.g004>

adaptation was significantly and positively correlated with the beginning of the RT1h (IDE $r = 0.46, p = 0.012$; RMSE $r = 0.578, p = 0.001$) (Fig 5). These results revealed that the exercise had no significant effects on the movement approach, the error values, or the error decrease rate during the adaptation set.

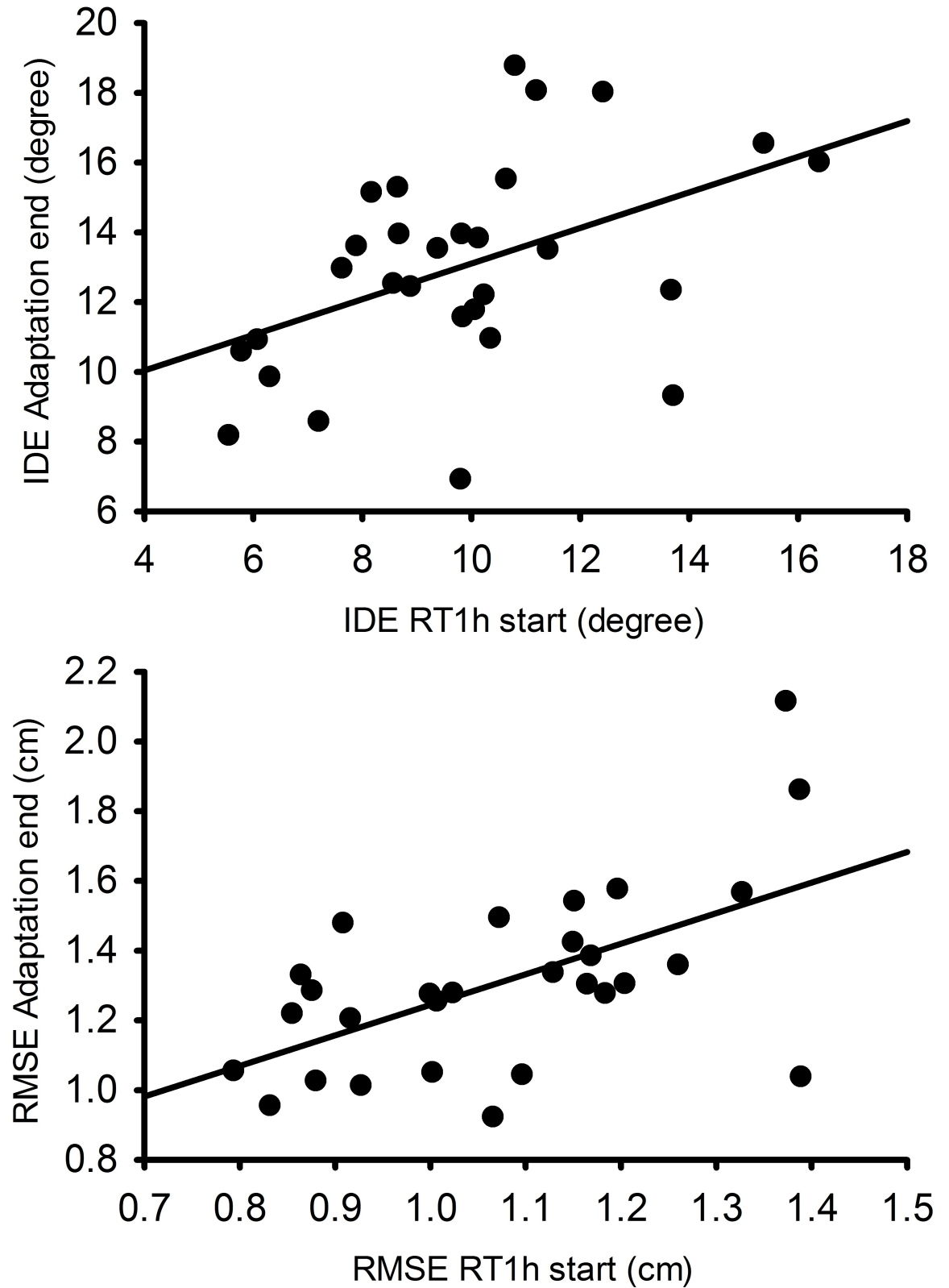


Fig 5. Correlation between error performance at the end of the adaptation and the start of the RT1h of the rVMA. IDE and RMSE mean errors were calculated at the end of the adaptation set (last 32 trials, 4 epochs) and at the start of the RT1h (first 32 trials, 4 epochs). Performance at the end of the adaptation and the start of RT1h were significantly correlated for both

error variables: IDE and RMSE. *Abbreviations:* RT1h = retention set at 1h from adaptation set; IDE = initial directional error; RMSE = root mean squared error; rVMA = rotational visuomotor adaptation task.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175296.g005>

Repeated-measures ANOVA was used to assess differences among groups during the retention sets (short-term = 1 h [RT1h]; mid-term = 24 h [RT24h]; and long-term = 7 d [RT7d]) of the rVMA task (Table 2 and Fig 6). There were no significant differences in the interaction between groups and sets regarding MT ($F_{(4, 52)} = 2.107$; $p = 0.093$; $\eta^2 p = 0.139$), TD ($F_{(4, 52)} = 1.161$; $p = 0.338$; $\eta^2 p = 0.082$), and RT ($F_{(4, 52)} = 0.192$; $p = 0.942$; $\eta^2 p = 0.015$). By contrast, significant group \times set interactions were found, with a large effect size, for both IDE ($F_{(4, 52)} = 30.946$; $p = 0.007$; $\eta^2 p = 0.233$) and RMSE ($F_{(4, 52)} = 3.685$; $p = 0.010$; $\eta^2 p = 0.221$). Post hoc analysis only depicted a significant difference for the IDE at RT1h, with both exercise groups (EX-rVMA: $p = 0.014$; rVMA-EX: $p = 0.007$) showing lower error values than the CON group, indicating a positive effect of exercise on the RT1h. No significant differences were found among the groups at RT24h and RT7d.

Discussion

In this experiment, we sought to assess the effect of a single bout of iE on the adaptation to, and retention of, an rVMA task. We also investigated whether the order of task and exercise presentation produced different retention results. Regarding the adaptation set, there were no differences in the rVMA between those who did and did not exercise before the task, as evaluated by output movement error variables (RL-IDE and RL-RMSE), indicating that exercise did not contribute to improving the RL. Likewise, the overall movement error performance (IDE and RMSE) and descriptive (MT, TD and RT) parameters were not enhanced by the exercise bout. Thus, these results did not support our hypothesis that exercise would have a positive effect on motor adaptation when presented before motor tasks[20,22].

Timing between exercise and task presentation, the task characteristics (type of task and complexity), and the exercise characteristics (type of exercise, duration, and intensity) are some of the factors that have been seen to modulate this exercise-brain function relation [11,31–33]. It is possible that the exercise intensity used in the present study may have hindered the possible beneficial effects of exercise for adaptation to the motor task after exercise. Similar results have been obtained by Roig et al. [21], who showed that a bout of high-intensity exercise before practicing a manual tracking task had no impact on adaptation. They proposed that exercise could induce fatigue, thereby hampering the possible benefits of exercise during adaptation by decreasing the accuracy. Considering the similarities between the exercise used in this and in Roig's study [21], we speculate that fatigue, in addition to excessive arousal, may have caused the observed results in the adaptation set of the rVMA task. However, Mang et al. [22] found that, despite using a similar high-intensity exercise program to the one used by Roig et al. [21], participants who exercised before the motor task adaptation had enhanced performance. Despite this enhanced adaptation, exercise-induced benefits were only observed in the temporal components of the motor task. In the present study, exercise did not boost motor adaptation on any of the spatial or temporal task parameters, possibly because of the moderating effects of task characteristics over exercise-induced benefits [11]. Thus, further research is necessary on the effects of high-intensity exercise on complex motor learning paradigms in task adaptation.

Regarding retention, IDE values were improved during short-term retention (RT1h) in both exercise groups. IDE is thought to reflect the planning of the movement direction, and thus the state of the internal model of the skill [27]. Consequently, we suggest that the performed bout of iE positively affected short-term consolidation and retrieval of the newly

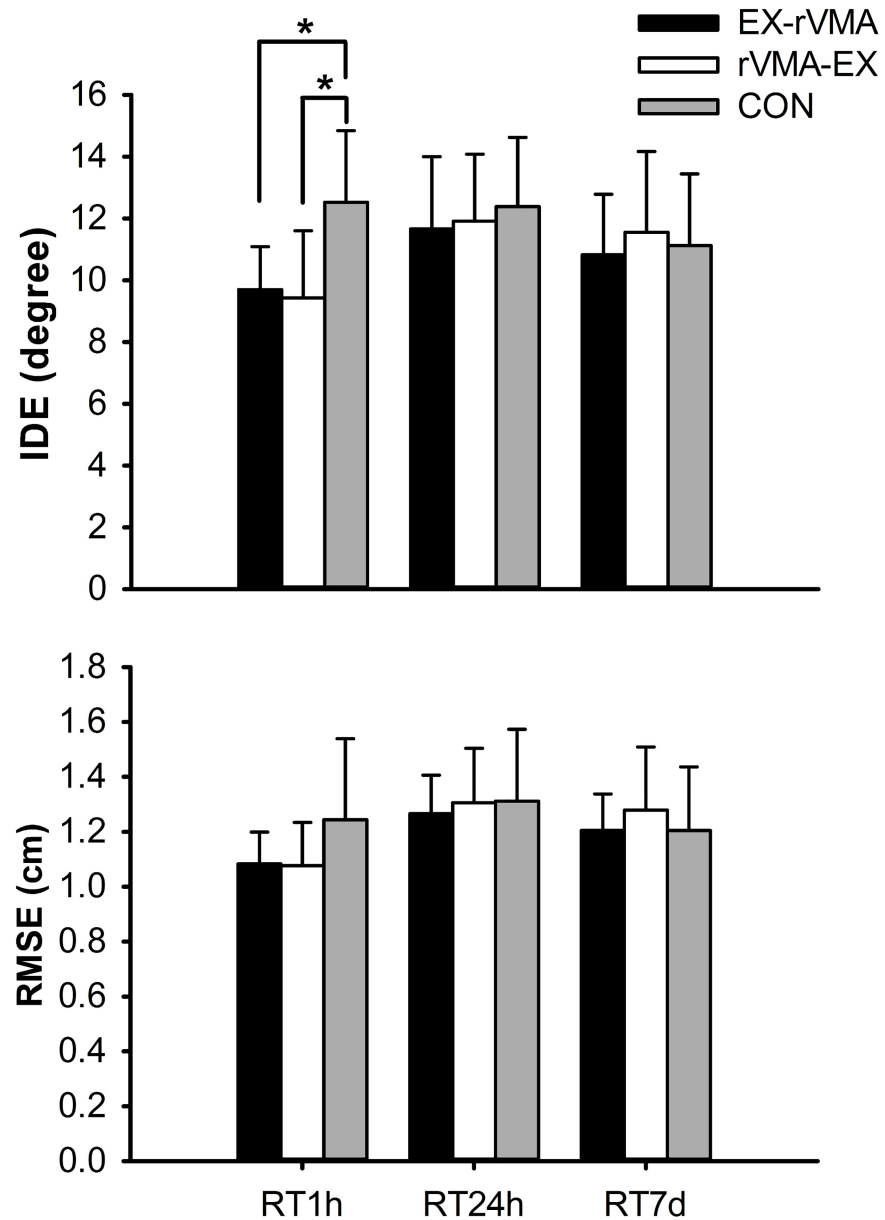


Fig 6. Error values among groups for the rVMA during the retention sets. Error values (mean and SD) are shown for the rVMA during the retention sets (short, RT1h, mid, RT24h, and long-term retention, RT7d). Significant differences between groups are represented by (*). *Abbreviations:* CON = no-exercise group; EX-rVMA = rVMA after exercise group; IDE = initial directional error; RL = Rate of learning; RMSE = root mean squared error; RT = reaction time (shown at 1 h = 24 h = and 7 days); rVMA = rotational visuomotor adaptation task; rVMA-EX = rVMA before exercise group.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175296.g006>

formed internal model of the motor skill. Rotational visuomotor adaptation tasks, are known to be dependent on cerebellar function [34]. It is known that acute intense exercise can impact the excitability of cerebellar circuits and that these cerebellar circuits may contribute to the exercise-induced increase in LTP-like plasticity in brain regions like premotor cortex [35]. However, more research is needed to improve our understanding of the mechanisms underlying the observed exercise-related boost on memory.

Although group differences were not confirmed, movement error expressed as the RMSE produced similar results to the IDE. It must be noted that RMSE includes initial movement planning and feedback-guided corrections during the path to the target. The fact that no differences were found among groups for the MT and TD at RT1h may indicate that quick and efficient correction of the trajectory occurred through the use of feedback in the control group. Despite participants in the exercise groups performing better at initial movement planning, feedback-guided corrections in the control group allowed them to correct the initial trajectory deviations to achieve comparable RMSE values to those of the exercise groups.

In contrast to the strengthening of the short-term retention (RT1h), exercise failed to maintain the observed benefits in the retention sets at 24 h (RT24h) and 7 days (RT7d) after adaptation. The IDE and RMSE values were similar for the three groups, indicating that exercise did not affect motor planning or feedback utilization at 24 h or 7 days after adaptation to the skill. Based on previous research [13,21,22], we hypothesized that exercise would positively impact the RT24h and RT7d results. Roig et al. [21] found that a single bout of high-intensity exercise enhanced motor memory retention at 24 h and 7 days after adaptation. In a study by Mang et al. [22], a similar exercise intervention enhanced mid-term retention of motor memory (24 h). It seems that, compared to previous research, we demonstrated the more acute and transient effect of exercise. Three factors could explain why exercise may not induce persistent effects on memory formation: differences in the exercise bout characteristics (i.e., intensity and/or exercise mode), the fitness level of the participants, and the characteristics of the learning task [33]. We will now examine each of these factors separately.

High-intensity exercise may have the potential to facilitate memory consolidation [21,22,36]. However, as seen in previous research, exercise bouts of insufficient intensity (low to moderate intensity) may not be sufficient to improve motor consolidation [20,37]. When compared with studies that succeeded in finding 24 h and 7 day improvements in long-term memory, the exercise intensity in the present study (estimated 85% VO_2max) may have been too low; for example, Mang et al. [22] used 90% of power output, which was similar to that utilized by Roig et al. [21]. In addition to intensity, there is evidence that the mode of exercise may influence its benefits. Recent reviews propose that cycling produces a greater effect on cognitive performance [31] and long-term memory [14] than running. Accordingly, the running intervention used in the present study could have produced inferior results when compared to those from similar studies that used cycling [21,22]. This hypothesis is somewhat supported by the results of Statton et al. [20], who successfully enhanced motor adaptation through moderate-intensity aerobic running, but failed to induce more long-term benefits in motor retention. Hence the exercise bout used in this study may have been too intense to improve adaptation, but insufficiently intense to enhance the retention at 24 h and 7 days, with retention benefits limited to 1 h after adaptation.

The fitness level of the participants could also have affected the extent of the exercise-induced improvements. Exercise has been reported to exert greater effects on long-term memory when participants have only average fitness levels [14]. Our sample seemed to have higher fitness levels which could explain differences between our results and those from previous studies. When comparing the fitness level of our exercise group (mean estimated VO_2max : 56.06, range: 43.3–63.6 ml/kg/min) to that of Mang et al. [22] (mean VO_2peak : 45.36, range: 30.4–63.4 ml/kg/min), it is plausible to consider that fitness level promoted mid-term retention in the study by Mang et al. [22], but promoted short-term retention in our study. However, when compared with the results presented by Roig et al. [21] (mean VO_2peak : 53.35, range: 44.1–64.1 ml/kg/min), who achieved enhanced mid- and long-term retention, the fitness level was similar to that in the present study. Therefore, it remains unclear how fitness level could moderate the exercise-induced improvements on motor learning. The fitness level

homogeneity of our sample limited the possibility to further explore the potential modulating effect of fitness level on the exercise-learning relationship. More research is necessary to increase our knowledge in terms of the effects of exercise on the mechanisms associated with learning improvement and the role of moderators (e.g., fitness level) in this relationship.

In addition to exercise characteristics and fitness level, task characteristics could also have affected the study results. It is known that the effect of exercise on cognitive function [11,31] and long-term memory formation [14] can be modulated by the paradigm of the cognitive or learning task used. In the present study, improvements in short term retention, 1 h from motor adaptation, were specifically observed for a rVMA task utilizing a 60° clockwise rotation. Previous research using motor procedural tasks have been successful in finding exercise-induced benefits on mid- and long-term memory at 24 h and 7 days after exposure [21,22]. However, to our knowledge, this is the first study describing the effect of an exercise intervention on the learning of a complex procedural motor skill that involved a multi-joint and multi-plane movement paradigm. The complexity of the rVMA task could have decreased the effect of exercise, limiting the anticipated mid- and long-term benefits. Moreover, the previous studies by Mang et al. [22] and Roig et al. [21] relied on tasks mainly focused on accuracy. By contrast, participants in our rVMA task were instructed to “move the cursor over the target as fast and as straight as possible”, which required not only accuracy but also speed of processing and execution. Research has differentiated the effects of exercise in speed and accuracy components of cognitive and simple motor tasks, with speed benefiting most from exercise [32]. Depending on the weight of the speed and accuracy components, and based on the results of previous research [32], we propose that the speed-accuracy relationship could alter the effect of exercise on memory consolidation. Therefore, the speed requirements in the execution of the rVMA task may have affected participant’s long-term memory formation. In addition, despite involving some form of motor adaptation, the use of alternative learning paradigms (e.g. implicit sequence learning) in previous studies [22] could explain different results compared to the present research possibly because of the implication of different neural pathways [38], among other factors.

Finally, contrary to what previous research has defined [21], we observed no differences in memory consolidation based on whether exercise was presented before or after the adaptation set. We presume that the initial consolidation stages may equally benefit from exercise regardless of whether it is presented before or after adaptation. However, the null effect of exercise on mid- and long-term retention hinders further speculation on how the order in which exercise is presented may modulate longer delayed effects. More research is needed to confirm whether the presentation order of the exercise relative to practice can trigger different mechanisms, as proposed by Roig et al. [21].

Despite finding an enhanced rVMA retention at 1 h as a consequence of the exercise intervention, our results may be affected by some limitations. It could be though that exercise effects on motor consolidation could be influenced by relearning because of the high amount of trials performed during the retention sets. However, IDE presented a similar trend of findings during the first trials of the RT1h set, compared to the overall set performance (see graph B in S1 Fig). Furthermore it seems that in comparison to other studies [21,22], the reduced exercise intensity and the mode of exercise (i.e., running) might have compromised the exercise-induced benefits on mid- and long-term retentions. Likewise, it is possible that the high fitness level of participants in the present study could have altered the mid- and long-term effects. Therefore, to confirm the mid- and long-term benefits seen in previous studies, there would be a need to use a higher exercise intensity (90% of VO₂max) and to include a population with regular fitness levels. Furthermore, the lack of neurochemical assessments limits our ability to comment on the mechanisms that may trigger the consolidation enhancement induced by exercise. In future research, the collection of blood samples to examine changes in

neurotransmitters and trophic factors concentrations may help clarify the mechanisms underlying the exercise-induced enhancement of memory consolidation.

Conclusions

In conclusion, a single bout of iE enhanced consolidation of an rVMA task, as expressed by improved retention at 1 h after task adaptation. Moreover, the order in which the exercise and the learned task were presented yielded similar benefits in retention at 1 h. However, we cannot reject the possibility of a long-term effect of exercise and task presentation order, because the exercise characteristics and fitness levels of the participants may have limited the benefits on mid and long-term retentions. Contrary to our expectation, exercising before a task practice did not improve the learning rate of the motor skill, probably because the exercise intensity was too high and there was a possibility of fatigue. Our results add evidence to the practical uses of exercise in learning and memory, but indicate that further research is needed to improve our understanding of how different exercise protocols affect procedural learning tasks. Moreover, to explore the effect of acute exercise on learning in different populations, future studies should aim to include participants with different fitness levels and ages.

Supporting information

S1 Fig. Exercise effects on motor adaptation and motor retention 1h. (A) IDE Performance is presented at the start and at the end of the adaptation (average of first and last 32 trials, respectively). IDE significantly decreased across all three groups as an effect of time, from start to end of the adaptation set. (B) IDE at the start (average of first 32 trials) and overall average IDE during the retention set at 1 hour (RT1h) are presented. Similar trends were observed between the RT1h start and the RT1h overall, which could indicate that exercise effects may begin from the start of RT1h. Additionally, performance level in all groups at the RT1h start was only slightly higher compared to their performance during adaptation end, meaning that some consolidation occurred during the 1 h rest period. *Abbreviations:* IDE = initial directional error; RT1h = Retention set at 1 hour; EX-rVMA = rVMA after exercise group; rVMA-EX = rVMA before exercise group; CON = no-exercise group. (TIFF)

Acknowledgments

We want to thank Binith Cheeran for his help with the equipment set-up.

This study was supported by Grup de Recerca en Activitat Física i Salut (GRAFiS, Generalitat de Catalunya 2014SGR/1629). We also want to thank Binith Cheeran for his help with the equipment set-up.

Author Contributions

Conceptualization: BF AB RA.

Data curation: BF AB RA.

Formal analysis: BF AB RA.

Funding acquisition: BF.

Investigation: BF AB VL MF RA.

Methodology: BF AB VL MF RA.

Project administration: RA.

Resources: BF AB VL MF RA.

Writing – original draft: BF AB RA.

Writing – review & editing: BF AB VL MF RA.

References

1. Vaynman S, Gomez-Pinilla F. Review Revenge of the “Sit”: How Lifestyle Impacts Neuronal and Cognitive Health Through Molecular Systems That Interface Energy Metabolism With Neuronal Plasticity. *2006*; 715: 699–715.
2. Hillman CH, Erickson KI, Kramer AAF. Be smart, exercise your heart: exercise effects on brain and cognition. *Nat Rev Neurosci*. 2008; 9: 58–65. Available: <http://www.nature.com/nrn/journal/v9/n1/abs/nrn2298.html> <https://doi.org/10.1038/nrn2298> PMID: 18094706
3. Neepes S a, Gómez-Pinilla F, Choi J, Cotman CW. Physical activity increases mRNA for brain-derived neurotrophic factor and nerve growth factor in rat brain. *Brain Res*. 1996; 726: 49–56. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8836544> PMID: 8836544
4. Vaynman S, Ying Z, Gomez-Pinilla F. Hippocampal BDNF mediates the efficacy of exercise on synaptic plasticity and cognition. *Eur J Neurosci*. 2004; 20: 2580–90. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2004.03720.x> PMID: 15548201
5. van Praag H, Shubert T, Zhao C, Gage FH. Exercise enhances learning and hippocampal neurogenesis in aged mice. *J Neurosci*. 2005; 25: 8680–5. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1731-05.2005> PMID: 16177036
6. Ding Q, Vaynman S, Akhavan M, Ying Z, Gomez-Pinilla F. Insulin-like growth factor I interfaces with brain-derived neurotrophic factor-mediated synaptic plasticity to modulate aspects of exercise-induced cognitive function. *Neuroscience*. 2006; 140: 823–33. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2006.02.084> PMID: 16650607
7. van Praag H, Christie BR, Sejnowski TJ, Gage FH. Running enhances neurogenesis, learning, and long-term potentiation in mice. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1999; 96: 13427–31. Available: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=23964&tool=pmcentrez&rendertype=abstract> PMID: 10557337
8. Griffin ÉW, Mullally S, Foley C, Warmington S a., O’Mara SM, Kelly ÁM, et al. Aerobic exercise improves hippocampal function and increases BDNF in the serum of young adult males. *Physiol Behav*. 2011; 104: 934–41. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2011.06.005> PMID: 21722657
9. Voss MW, Nagamatsu LS, Liu-Ambrose T, Kramer a. F. Exercise, brain, and cognition across the life span. *J Appl Physiol*. 2011; 111: 1505–1513. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00210.2011> PMID: 21527670
10. Smith PJ, Blumenthal J a, Hoffman BM, Cooper H, Strauman T a, Welsh-Bohmer K, et al. Aerobic exercise and neurocognitive performance: a meta-analytic review of randomized controlled trials. *Psychosom Med*. 2010; 72: 239–52. <https://doi.org/10.1097/PSY.0b013e3181d14633> PMID: 20223924
11. Chang YK, Labban JD, Gapin JI, Etnier JL. The effects of acute exercise on cognitive performance: a meta-analysis. *Brain Res. Elsevier B.V.*; 2012; 1453: 87–101. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2012.02.068> PMID: 22480735
12. Coles K, Tomporowski PD. Effects of acute exercise on executive processing, short-term and long-term memory. *J Sports Sci*. 2008; 26: 333–44. <https://doi.org/10.1080/02640410701591417> PMID: 18074301
13. Winter B, Breitenstein C, Mooren FC, Voelker K, Fobker M, Lechtermann A, et al. High impact running improves learning. *Neurobiol Learn Mem*. 2007; 87: 597–609. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2006.11.003> PMID: 17185007
14. Roig M, Nordbrandt S, Geertsen SS, Nielsen JB. The effects of cardiovascular exercise on human memory: A review with meta-analysis. *Neurosci Biobehav Rev. Elsevier Ltd*; 2013; 37: 1645–1666. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.06.012> PMID: 23806438
15. Strauss E, Spreen O, Sherman EMS. A Compendium of neuropsychological tests: administration, norms, and commentary [Internet]. Oxford [etc.]: Oxford University Press; 2006. Available: http://cataleg.ub.edu/record=b1901933~S1*sp
16. Bekinschtein P, Cammarota M, Izquierdo I, Medina JH. BDNF and memory formation and storage. *Neuroscientist*. 2008; 14: 147–156. <https://doi.org/10.1177/1073858407305850> PMID: 17911219

17. Robertson EM, Pascual-Leone A, Miall RC. Current concepts in procedural consolidation. *Nat Rev Neurosci*. 2004; 5: 576–582. <https://doi.org/10.1038/nrn1426> PMID: 15208699
18. Squire LR. Memory systems of the brain: A brief history and current perspective. *Neurobiol Learn Mem*. 2004; 82: 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2004.06.005> PMID: 15464402
19. Krakauer JW, Shadmehr R. Consolidation of motor memory. *Trends Neurosci*. 2006; 29: 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2005.10.003> PMID: 16290273
20. Statton MA, Encarnacion M, Celnik P, Bastian AJ. A Single Bout of Moderate Aerobic Exercise Improves Motor Skill Acquisition. *PLoS One*. 2015; 10: e0141393. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141393> PMID: 26506413
21. Roig M, Skriver K, Lundbye-Jensen J, Kiens B, Nielsen JB. A single bout of exercise improves motor memory. *PLoS One*. 2012; 7: e44594. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044594> PMID: 22973462
22. Mang CS, Snow NJ, Campbell KL, Ross CJD, Boyd LA. A single bout of high-intensity aerobic exercise facilitates response to paired associative stimulation and promotes sequence-specific implicit motor learning. *J Appl Physiol*. 2014; 117: 1325–36. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00498.2014> PMID: 25257866
23. Mang CS, Snow NJ, Wadden KP, Campbell KL, Boyd LA. High-Intensity Aerobic Exercise Enhances Motor Memory Retrieval. *Med Sci Sport Exerc*. 2016; 48: 2477–2486.
24. Labelle V, Bosquet L, Mekary S, Bherer L. Decline in executive control during acute bouts of exercise as a function of exercise intensity and fitness level. *Brain Cogn*. 2013; 81: 10–7. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.10.001> PMID: 23146780
25. Thomas R, Johnsen LK, Geertsens SS, Christiansen L, Ritz C, Roig M, et al. Acute Exercise and Motor Memory Consolidation: The Role of Exercise Intensity. Philp A, editor. *PLoS One*. Public Library of Science; 2016; 11: e0159589. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159589> PMID: 27454423
26. Léger L a, Mercier D, Gadoury C, Lambert J. The multistage 20 metre shuttle run test for aerobic fitness. *J Sports Sci*. 1988; 6: 93–101. <https://doi.org/10.1080/02640418808729800> PMID: 3184250
27. Contreras-Vidal JL, Bo J, Boudreau JP, Clark JE. Development of visuomotor representations for hand movement in young children. *Exp Brain Res*. 2005; 162: 155–164. <https://doi.org/10.1007/s00221-004-2123-7> PMID: 15586275
28. Krakauer JW, Ghez C, Ghilardi MF. Adaptation to visuomotor transformations: consolidation, interference, and forgetting. *J Neurosci*. 2005; 25: 473–8. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4218-04.2005> PMID: 15647491
29. Coats RO, Wilson AD, Snapp-Childs W, Fath AJ, Bingham GP. The 50s cliff: perceptuo-motor learning rates across the lifespan. *PLoS One*. 2014; 9: e85758. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085758> PMID: 24475051
30. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences [Internet]. Hillsdale (N.J.): Lawrence Erlbaum Associates; 1988. Available: http://catalog.ub.edu/record=b1105334~S1*spj
31. Lambourne K, Tomporowski P. The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: a meta-regression analysis. *Brain Res*. 2010; 1341: 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.03.091> PMID: 20381468
32. McMorris T, Hale BJ. Differential effects of differing intensities of acute exercise on speed and accuracy of cognition: A meta-analytical investigation. *Brain Cogn*. Elsevier Inc.; 2012; 80: 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.09.001> PMID: 23064033
33. Roig M, Thomas R, Mang CS, Snow NJ, Ostadan F, Boyd LA, et al. Time-Dependent Effects of Cardiovascular Exercise on Memory. *Exerc Sport Sci Rev*. 2016; 44: 81–88. <https://doi.org/10.1249/JES.000000000000078> PMID: 26872291
34. Bernard JA, Seidler RD. Cerebellar contributions to visuomotor adaptation and motor sequence learning: an ALE meta-analysis. *Front Hum Neurosci*. 2013; 7: 27. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00027> PMID: 23403800
35. Mang CS, Brown KE, Neva JL, Snow NJ, Campbell KL, Boyd LA. Promoting Motor Cortical Plasticity with Acute Aerobic Exercise: A Role for Cerebellar Circuits. *Neural Plast*. 2016; 2016.
36. Skriver K, Roig M, Lundbye-Jensen J, Pingel J, Helge JW, Kiens B, et al. Acute exercise improves motor memory: Exploring potential biomarkers. *Neurobiol Learn Mem*. Elsevier Inc.; 2014; 116: 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2014.08.004> PMID: 25128877
37. Snow NJ, Mang CS, Roig M, McDonnell MN, Campbell KL, Boyd LA. The Effect of an Acute Bout of Moderate-Intensity Aerobic Exercise on Motor Learning of a Continuous Tracking Task. *PLoS One*. 2016; 11: e0150039. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150039> PMID: 26901664
38. Krakauer JW, Mazzoni P. Human sensorimotor learning: adaptation, skill, and beyond. *Curr Opin Neurobiol*. 2011; 21: 636–644. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2011.06.012> PMID: 21764294