Neurociencia y deporte:

fundamentos, aplicaciones y desafíos éticos



NEUROCIENCIA

RENDIMIENTO DEPORTIVO

APRENDIZAJE MOTOR

ÉTICA

COMPILACIÓN

Juan Miguel Luperón Terry, Ph.D.

EDITORIAL UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO

Por ti UTB

Neurociencia y deporte: fundamentos, aplicaciones y desafíos éticos.

ISBN: 978-9942-606-80-8 (eBook)



Editado por:
Universidad Técnica de Babahoyo
Avenida Universitaria Km 2.5 Vía a Montalvo
Teléfono: 052 570 368
© Reservados todos los derechos 2026

Babahoyo, Ecuador
www.utb.edu.ec
E-mail: editorial@utb.edu.ec

Este texto ha sido sometido a un proceso de evaluación por pares externos.

Diseño y diagramación, montaje y producción editorial
Universidad Técnica de Babahoyo

Babahoyo – Los Ríos – Ecuador

Queda prohibida toda la reproducción de la obra o partes de la misma por cualquier medio, sin la preceptiva autorización previa.

PREFACIO

Neurociencia y deporte: una frontera emergente del conocimiento

Juan Miguel Luperón Terry, Ph.D.
Coordinador Científico

La ciencia, en su permanente devenir, nos ha enseñado que las fronteras más fértiles del conocimiento no se encuentran en el interior de las disciplinas, sino en sus intersecciones. Es precisamente en el cruce entre la neurociencia y las ciencias del deporte donde emerge un territorio de enorme potencial, capaz de transformar nuestra comprensión del movimiento humano, del rendimiento y de la propia condición atlética.

Durante décadas, el estudio del deporte estuvo dominado por una mirada predominantemente biomecánica y fisiológica. Se analizaban con detalle la fuerza muscular, la capacidad aeróbica, la técnica de ejecución y los procesos metabólicos que sostienen el esfuerzo físico. Sin embargo, estas aproximaciones, aun siendo indispensables, dejaban en la penumbra una pregunta fundamental: ¿qué ocurre en el cerebro cuando un deportista entrena, aprende, decide, se fatiga, se recupera o se lesiona?

La respuesta a esta interrogante ha comenzado a construirse en las últimas dos décadas, gracias al desarrollo vertiginoso de las neurociencias cognitivas y de las técnicas de neuroimagen, neuroestimulación y neurofeedback. Hoy sabemos que el cerebro no es un simple ejecutor de órdenes motoras, sino un regulador activo, dinámico y plástico del rendimiento deportivo. Sabemos que las funciones ejecutivas, la atención, la percepción, la memoria de trabajo y la toma de decisiones son componentes esenciales del desempeño atlético. Sabemos que la fatiga no es solo un fenómeno muscular, sino también central, y que la recuperación implica procesos neurobiológicos complejos que van más allá del descanso pasivo. Sabemos, en definitiva, que el deportista es un ser integral donde cuerpo, cerebro y mente operan de manera indisociable.

Este libro, *"Neurociencia y deporte: fundamentos neurobiológicos, aplicaciones prácticas y desafíos éticos"*, nace con la vocación de reunir, en un solo volumen, los avances más relevantes de esta frontera emergente del conocimiento. Se trata de una compilación cuidadosamente estructurada que conduce al lector desde los fundamentos moleculares y celulares de la plasticidad neuronal hasta las aplicaciones prácticas en el entrenamiento, la rehabilitación y la competición, sin eludir las complejas cuestiones éticas y legales que el uso de neurotecnologías plantea en el deporte contemporáneo.

Los diecisiete capítulos que componen esta obra han sido elaborados por investigadores y profesionales de diversas áreas del conocimiento, todos ellos comprometidos con la excelencia académica y con la transferencia del conocimiento científico a la práctica deportiva. Cada capítulo ha sido sometido a un riguroso proceso de revisión y reescritura, con el fin de garantizar la precisión conceptual, la actualidad de las referencias y la claridad expositiva. El resultado es un texto que no solo informa, sino que también forma y estimula la reflexión crítica.

El lector encontrará en estas páginas análisis detallados sobre las funciones ejecutivas y su influencia en la planificación de acciones deportivas; sobre los sistemas energéticos y su

regulación neurológica; sobre la memoria, el aprendizaje y la consolidación de habilidades motoras; sobre la atención, la percepción y la toma de decisiones; sobre la neuropsicología del estrés y la ansiedad competitiva; sobre la neuroplasticidad y las adaptaciones funcionales del sistema nervioso al entrenamiento; sobre las respuestas neuroendocrinas, la fatiga y la recuperación; sobre las lesiones deportivas con afectación neurológica y los principios de la neurorrehabilitación; sobre las terapias complementarias basadas en estimulación cerebral; y sobre las implicaciones éticas y legales que todo este conocimiento conlleva.

Esta obra no habría sido posible sin la generosidad intelectual y el esfuerzo sostenido de cada uno de los autores que han contribuido con sus capítulos. A ellos, mi más sincero reconocimiento y gratitud. Extiendo también mi agradecimiento a los revisores y al equipo editorial, cuyo rigor y exigencia han elevado la calidad de este volumen hasta los estándares de las mejores publicaciones académicas internacionales.

Deseo expresar, asimismo, mi profunda convicción de que este libro representa una contribución significativa al campo de la neurociencia aplicada al deporte. No solo por la actualidad y pertinencia de sus contenidos, sino por su capacidad de tender puentes entre la investigación básica y la práctica profesional, entre el laboratorio y la cancha, entre la ciencia y el deportista. En un mundo donde la presión por el rendimiento es creciente y donde la tecnología avanza a un ritmo vertiginoso, obras como esta nos recuerdan que el deporte, en su esencia más profunda, es una expresión integral del ser humano, donde el cerebro y el cuerpo, la emoción y la razón, la ética y la excelencia, se entrelazan de manera inseparable.

Invito, por tanto, al lector a sumergirse en estas páginas con curiosidad, con espíritu crítico y con la convicción de que el conocimiento aquí reunido no solo ampliará su comprensión del deporte, sino que también contribuirá a formar deportistas más conscientes, entrenadores más informados y profesionales más comprometidos con la salud, la equidad y la dignidad humana.

Que este libro sea, en definitiva, un aporte sustantivo al desarrollo de un deporte más científico, más humano y más sostenible.

Juan Miguel Luperón Terry, Ph.D.
Coordinador Científico
Universidad Técnica de Babahoyo
Ecuador, 2026

COMPILADOR:

Juan Miguel Luperón Terry, Ph. D.

AUTORES:

Lcda. Mercedes Jessenia Gaibor Villegas, Msc.

Lcda. Golda Geovanna López Bustamante, Ph. D.

Lcdo. Cesar Efren Vivero Quintero, Msc.

Ps. Juan Antonio Vera Zapata, Msc.

Lcdo. Jorge Luis Serrano Aguilar, Msc

Lcda. Mónica Patricia Acurio Acurio, Msc.

Lcdo. Ricardo José Jiménez González, Msc.

Lcdo. Byron Andrés Sani Aldaz, Msc.

Lcda. Verónica María Valle Delgado, Ph.D.

Lcda. Silvia Del Carmen Lozano Chaguay, Msc

Lcda. Yngrid Paola Espin Mancilla, Msc.

Dr. Constantino Darroman Hall, Msc.

PRÓLOGO

Neurociencia y deporte: una alianza estratégica para el rendimiento, la salud y la formación humana

Por Idalkis Segura Rodríguez, Ph.D.
Decana de la Facultad de Cultura Física
Universidad de Holguín, Cuba

La relación entre el cerebro y el movimiento ha fascinado a la humanidad desde tiempos inmemoriales. Sin embargo, ha sido en las últimas décadas cuando la convergencia entre la neurociencia y las ciencias del deporte ha alcanzado un nivel de desarrollo y sofisticación que permite no solo comprender los mecanismos neurales del rendimiento, sino también intervenir de manera activa para optimizarlo, protegerlo y rehabilitarlo.

Desde mi experiencia como decana de la Facultad de Cultura Física de la Universidad de Holguín, he sido testigo del creciente interés de estudiantes, docentes e investigadores por comprender cómo el cerebro regula el movimiento, el aprendizaje y el rendimiento deportivo. Esta obra colectiva, titulada "Neurociencia y deporte: fundamentos neurobiológicos, aplicaciones prácticas y desafíos éticos", coordinada por el Dr. Juan Miguel Luperón Terry, Ph.D., responde precisamente a esa necesidad: ofrecer una obra de referencia que integre, desde una perspectiva rigurosa y actualizada, los principales avances en la neurobiología del movimiento, el aprendizaje motor, la fatiga, la recuperación, la lesión y la rehabilitación, así como las tecnologías emergentes y sus implicaciones éticas y legales.

La obra que el lector tiene en sus manos es el resultado de un trabajo colaborativo y multidisciplinario, en el que han participado investigadores, docentes y profesionales del deporte, todos ellos con una sólida formación en neurociencias y una profunda vocación por trasladar el conocimiento científico a la práctica deportiva. Cada capítulo ha sido sometido a un exhaustivo proceso de revisión y reescritura, con el fin de garantizar no solo la precisión y actualidad de los contenidos, sino también su claridad expositiva y su aplicabilidad en contextos reales de entrenamiento, competición y rehabilitación.

El libro se organiza en torno a diecisiete capítulos que cubren el amplio espectro de la neurociencia aplicada al deporte. Los primeros capítulos sientan las bases neurobiológicas del movimiento, abordando las funciones ejecutivas, los sistemas energéticos, la memoria y el aprendizaje motor, la atención y la toma de decisiones, así como la neuropsicología del estrés y la ansiedad. A continuación, se adentran en los procesos de plasticidad neuronal, las respuestas neuroendocrinas al entrenamiento, la neurobiología de la fatiga y la recuperación, y las adaptaciones funcionales del sistema nervioso al ejercicio. La obra dedica también una atención especial a las lesiones deportivas con afectación neurológica, a los principios y aplicaciones de la neurorrehabilitación, a las terapias complementarias basadas en estimulación cerebral, y culmina con un análisis profundo de las implicaciones éticas y legales del uso de neurotecnologías en el deporte.

Este recorrido temático refleja la convicción de que el deportista no es un mero ejecutor de órdenes biomecánicas, sino un ser integral en el que el cerebro, el cuerpo, las emociones y el contexto social interactúan de manera constante y dinámica. Comprender esta interacción no solo permite mejorar el rendimiento, sino también prevenir lesiones, acelerar la recuperación y promover una práctica deportiva más consciente, saludable y sostenible.

En un mundo donde la tecnología avanza a pasos agigantados y donde la presión por obtener resultados inmediatos es cada vez mayor, este libro aspira a ser un faro que ilumine el camino hacia un deporte más científico, más humano y más ético. Aspira a ofrecer a entrenadores, preparadores físicos, fisioterapeutas, psicólogos deportivos, pedagogos y estudiantes de educación física las herramientas conceptuales y prácticas necesarias para comprender y abordar los procesos neurológicos que subyacen al movimiento humano.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos los autores que han contribuido con sus conocimientos, experiencias y reflexiones a la construcción de esta obra colectiva. También a los revisores y editores que, con su rigor y exigencia, han elevado la calidad de los capítulos hasta alcanzar los estándares de las mejores editoriales académicas internacionales.

Invito al lector a sumergirse en estas páginas con la curiosidad del investigador, la mirada del profesional y la pasión del deportista. Confío en que este libro no solo será una herramienta de consulta indispensable, sino también una fuente de inspiración para seguir explorando los fascinantes vínculos entre el cerebro y el movimiento, entre la ciencia y el deporte, entre el conocimiento y la acción.

Idalkis Segura Rodríguez, Ph. D.
Decana de la Facultad de Cultura Física
Universidad de Holguin, Cuba
Correo: jlrosales@uho.edu.cu

INDICE

PREFACIO I
PRÓLOGO IV
PARTE I. FUNDAMENTOS NEUROBIOLÓGICOS DEL MOVIMIENTO CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN A LA NEUROCIENCIA Y SU IMPORTANCIA EN EL ÁMBITO DEPORTIVO. Autora: Lcda. Mercedes Jessenia Gaibor Villegas, Msc. 1
1.1. INTRODUCCIÓN 3
1.2. DESARROLLO 4
1.2.1. Neuroplasticidad y aprendizaje motor 6
1.2.2. Atención, concentración y procesamiento cognitivo en el rendimiento deportivo 6
1.2.3. Toma de decisiones, percepción y anticipación en el deporte 7
1.2.4. Memoria motora y automatización de habilidades deportivas. 8
1.2.5. Regulación emocional, sistema límbico y estrés competitivo. 9
1.2.6. Motivación, dopamina y rendimiento deportivo. 10
1.2.7. Fatiga mental y su impacto en el desempeño físico. 11
1.2.8. Neurotecnologías aplicadas al deporte. 11
1.2.9. Sueño, recuperación cerebral y rendimiento deportivo. 12
1.2.10. Aplicaciones prácticas de la neurociencia en el entrenamiento deportivo 13
1.2.11. Neurociencia y prevención de lesiones deportivas. 14
1.2.12. Aspectos éticos en el uso de neurociencia y neurotecnologías en el deporte. 15
1.2.13. Limitaciones de la investigación actual y futuras direcciones. 16
1.2.14. Futuras líneas de investigación deberían explorar: 17
1.3. CONCLUSIONES 17
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 18
CAPITULO 2: ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL SISTEMA NERVIOSO: CAPITULO Autora: Lcda. Golda López Bustamante, Ph.D. 22
2.1. INTRODUCCIÓN 24
2.2. DESARROLLO 24
2.2.1. Organización del sistema nervioso 24
2.2.2. Estructuras cerebrales implicadas en el control motor. 26
2.2.3. Comunicación entre el sistema nervioso y los músculos. 27
2.2.4. Neuroplasticidad y aprendizaje motor. 29
2.2.5. Estimulación del sistema nervioso mediante el ejercicio. 30
2.2.6. Aplicaciones prácticas para entrenadores y deportistas. 31
2.2.7. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras. 32
2.3. CONCLUSIONES 32
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 33

CAPITULO 3: PLASTICIDAD NEURONAL Y SU RELACIÓN CON EL APRENDIZAJE Y EL RENDIMIENTO DEPORTIVO:AUTOR: Lcdo. JuanMiguel Luperón Terry, Ph. D. 35
3.1. INTRODUCCIÓN 37
3.2. DESARROLLO 37
3.2.1. Bases celulares y moleculares de la plasticidad. 38
3.2.3. Neuroplasticidad y aprendizaje motor. 39
3.2.4. Mecanismos de plasticidad inducida por el entrenamiento. 40
3.2.5. Períodos críticos y sensibles en el desarrollo deportivo. 40
3.2.6. Neuroplasticidad y rendimiento deportivo. 40
3.2.7. Principios del entrenamiento basados en la neuroplasticidad 41
3.2.8. Aplicaciones prácticas para entrenadores y preparadores físicos. 42
3.2.9. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras. 43
3.2.10. Futuras líneas de investigación deberían explorar: 44
3.3. CONCLUSIONES 44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 45
CAPITULO 4: BASES NEUROLÓGICAS DEL CONTROL MOTOR Y LA COORDINACIÓN DE MOVIMIENTOS, AUTOR: Ps. Juan Antonio Vera Zapata, Msc. 47
4.1. INTRODUCCIÓN 49
4.2. DESARROLLO 50
4.2.1. Organización neuroanatómica del sistema motor. 50
4.2.2. Vías motoras descendentes. 52
4.2.3. Integración sensorial y control de la coordinación. 53
4.2.3.2. Sistema vestibular. 54
4.2.3.3. Visión. 54
4.2.4. Teorías del control motor. 56
4.2.5. Aprendizaje motor y neuroplasticidad. 57
4.2.6. Fases del aprendizaje motor. 57
4.2.7. Implicaciones para el entrenamiento. 62
4.2.8. Principios del entrenamiento basados en la neuroplasticidad. 62
4.2.9. Aplicaciones prácticas para el entrenamiento y la rehabilitación. 62
4.2.10. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras. 63
4.3. CONCLUSIONES 64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64
PARTE II. 67
COGNICIÓN, EMOCIÓN Y RENDIMIENTO 67
CAPITULO 5:ATENCIÓN, PERCEPCIÓN Y TOMA DE DECISIONES EN EL DEPORTE. AUTOR: Lcdo. Jorge Luis Serrano Aguilar, Msc. 67
5.1. INTRODUCCIÓN 69

5.2. DESARROLLO 69
5.2.1. Fundamentos neurobiológicos de la atención, la percepción y la toma de decisiones. 69
5.2.2. La atención como proceso cognitivo fundamental en el deporte. 70
5.2.3. Tipos de atención en el deporte. 71
5.2.4. Factores que influyen en la atención deportiva. 71
5.2.5. Entrenamiento de la atención en el deporte. 72
5.2.6. La percepción como proceso interpretativo del entorno deportivo. 72
5.2.7. Percepción visual en el deporte. 73
5.2.8. Percepción auditiva y propioceptiva. 73
5.2.9. Influencia emocional en la percepción. 73
5.2.10. Tipos de percepción temporal en el deporte. 73
5.2.11. La toma de decisiones en el contexto deportivo. 74
5.2.12. Características de la toma de decisiones en el deporte. 74
5.2.13. Toma de decisiones consciente y automática. 74
5.2.14. Factores que influyen en la toma de decisiones deportivas. 75
5.2.15. Modelos teóricos de la toma de decisiones en el deporte. 75
5.2.16. Interrelación entre atención, percepción y toma de decisiones. 76
5.2.17. Ansiedad competitiva y su influencia en los procesos cognitivos. 77
5.2.18. Consecuencias de la ansiedad sobre la atención, percepción y decisión. 78
5.2.19. Habilidades cognitivas en el deporte. 78
5.2.20. Estrategias de entrenamiento cognitivo en el deporte. 78
5.2.21. Atención, percepción y toma de decisiones en el deporte formativo. 80
5.2.22. Atención, percepción y toma de decisiones en el deporte de alto rendimiento. 80
5.2.23. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras. 80
5.3. CONCLUSIONES 81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 82
CAPITULO 6: MEMORIA, APRENDIZAJE Y CONSOLIDACIÓN DE HABILIDADES MOTORAS: AUTORA: Lcda. Mónica Patricia Acurio Acurio, Msc. 86
6.1. INTRODUCCIÓN 88
6.2. DESARROLLO 89
6.2.1. Fundamentos neurobiológicos del aprendizaje motor. 89
6.2.2. Neuroplasticidad y aprendizaje motor. 89
6.2.3. Tipos de memoria implicados en las habilidades motoras. 90
6.2.4. El sustrato neural de la memoria procedimental incluye: 91
6.2.5. Fases del aprendizaje motor. 92
6.2.6. Mecanismos de percepción, decisión y ejecución en el aprendizaje motor. 93
6.2.7. Papel del sistema nervioso central en el aprendizaje motor. 94

6.2.8. Consolidación de la memoria motora. 94
6.2.9. Los factores que influyen en la consolidación incluyen: 95
6.2.10. Factores que influyen en el aprendizaje motor. 95
6.2.11. Transferencia del aprendizaje motor. 96
6.2.12. Teorías y modelos de aprendizaje y control motor en neurorrehabilitación. 98
6.2.13. Aplicaciones en neurorrehabilitación. 99
6.2.14. Aplicaciones prácticas para entrenadores, educadores y rehabilitadores. 99
6.2.15. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras. 100
6.3. CONCLUSIONES 101
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 102
CAPITULO 7: FUNCIONES EJECUTIVAS Y SU INFLUENCIA EN LA PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN DE ACCIONES DEPORTIVAS: Autor: Juan Miguel Luperón Terry, Ph.D. 104
7.1. INTRODUCCIÓN 106
7.2. DESARROLLO 107
7.2.1. Fundamentos neurobiológicos de las funciones ejecutivas y plasticidad cerebral inducida por el deporte. 107
7.2.2. Componentes de las funciones ejecutivas y su papel en el deporte. 107
7.2.3. Evidencia empírica de la relación entre funciones ejecutivas y rendimiento deportivo. 109
7.2.4. Fatiga mental y su impacto en las funciones ejecutivas durante la competición. 110
7.2.5. Entrenamiento cognitivo y ejercicio físico para mejorar las funciones ejecutivas en deportistas. 111
7.2.6. Evaluación neuropsicológica de las funciones ejecutivas en deportistas. 111
7.2.7. Evaluación ecológica mediante realidad virtual y seguimiento ocular. 113
7.2.8. Utilidad práctica para entrenadores y cuerpos técnicos. 113
7.2.9. Aplicaciones prácticas para entrenadores y preparadores físicos. 113
7.2.10. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras. 114
7.3. CONCLUSIONES 114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 115
CAPITULO 8: NEUROPSICOLOGÍA DEL ESTRÉS Y LA ANSIEDAD EN EL DEPORTE: Autor: Lcdo. Ricardo José Jiménez González, Msc. 118
8.1. INTRODUCCIÓN 120
8.2. DESARROLLO 120
8.2.1 Fundamentos neurobiológicos del estrés. 120
8.2.1.2. Estrés agudo vs. estrés crónico. 121
8.2.2. Función adaptativa del estrés en el rendimiento deportivo. 121
8.2.3. Las bases neurobiológicas de la ansiedad. 122
8.2.4. El Papel de la amígdala cerebral. 122

8.2.5. Intervención del hipocampo y memoria emocional. 122
8.2.6. Regulación de la corteza prefrontal. 123
8.2.7. Neurotransmisores implicados en el estrés y la ansiedad. 123
8.2.8. Consecuencias cognitivas del estrés y la ansiedad en el deporte. 125
8.2.9. Toma de decisiones y control de impulsos. 125
8.2.10. La memoria, aprendizaje y rendimiento técnico. 126
8.2.11. La Fatiga mental, burnout y desgaste emocional. 126
8.2.12. El Estrés, ansiedad y riesgo de lesiones. 127
8.2.13. La Teorías explicativas del estrés y el rendimiento. 127
8.2.14. Críticas y modelos alternativos. 128
8.2.15. Estrategias de intervención neuropsicológica. 130
8.2.16. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras 131
8.3. CONCLUSIONES 132
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 132
PARTE III. 137
FATIGA, RECUPERACIÓN Y LESIONES 137
CAPITULO 9: SISTEMA ENERGÉTICO Y SU RELACIÓN NEUROLÓGICA DURANTE EL EJERCICIO:AUTOR*: Lcdo. Byron Andrés Sani Aldaz, Msc.* 137
9.1. INTRODUCCIÓN 139
9.2. DESARROLLO 140
9.2.1. Fundamentos de los sistemas energéticos; Concepto y bases fisiológicas 140
9.2.2. Sistema anaeróbico aláctico (ATP-PCr). 141
9.2.3. Sistema anaeróbico láctico (glucolítico). 141
9.2.4. Sistema aeróbico (oxidativo). 142
9.2.5. Sustratos energéticos utilizados: 142
9.2.6. Adaptaciones inducidas por el entrenamiento aeróbico sistemático: 143
9.2.7. Regulación neurológica de los sistemas energéticos; Papel del sistema nervioso central 144
9.2.8. Influencia del sistema nervioso autónomo. 144
9.2.9. Fatiga neuromuscular y percepción del esfuerzo. 145
9.2.10. Implicaciones para el entrenamiento deportivo y la educación física. 146
9.2.11. Aplicaciones en educación física. 146
9.2.12. Recomendaciones prácticas para entrenadores y educadores. 147
9.2.13. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras. 147
9.3. CONCLUSIONES 148
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. 149
CAPITULO 10: RESPUESTAS NEUROENDOCRINAS AL ENTRENAMIENTO Y LA ACTIVIDAD FÍSICA. AUTOR: Lcdo. Cesar Efren Vivero Quintero, Msc. 151

10.1. INTRODUCCIÓN 153
10.2. DESARROLLO 154
10.2.1. Fundamentos del sistema neuroendocrino; Definición y componentes del sistema neuroendocrino. 154
10.2.2. Respuestas neuroendocrinas según la duración del ejercicio 155
10.2.3. Adaptaciones neuroendocrinas al entrenamiento. 157
10.2.4. Factores que modulan las respuestas neuroendocrinas. 158
10.2.5. Aplicaciones prácticas para entrenadores y preparadores físicos. 159
10.2.6. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras. 160
10.3. CONCLUSIONES 160
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 161
PARTE IV. 163
NEURORREHABILITACIÓN Y NEUROTECNOLOGÍAS 163
CAPITULO 11: NEUROBIOLOGÍA DE LA FATIGA Y LA RECUPERACIÓN EN EL DEPORTE: *AUTORA: Lcda. Verónica María Valle Delgado, Ph.D.* 163
11.1. INTRODUCCIÓN 165
11.2. DESARROLLO 166
11.2.1. Concepto y clasificación de la fatiga en el deporte. 166
11.2.2. Clasificación de la fatiga: periférica y central. 167
11.2.3. Interacción entre la fatiga central y periférica. 168
11.2.4. Neurobiología de la fatiga: neurotransmisores y mecanismos 168
11.2.5.Bases neuroanatómicas del control motor durante la fatiga. 170
11.2.6. Percepción del esfuerzo y fatiga mental. 171
11.2.7. Neurobiología de la recuperación tras el ejercicio. 173
11.2.8. Sueño, descanso y plasticidad neuronal. 174
11.2.9. Estrés, fatiga mental y recuperación. 174
11.2.10. Síndrome de sobreentrenamiento desde la neurobiología. 175
11.2.11. Los deportistas que atraviesan un proceso de sobreentrenamiento suelen presentar: 175
11.2.12. Estrategias neurobiológicas de recuperación. 176
11.2.13. Manejo del estrés y recuperación mental. 177
11.2.14. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras. 178
11.3. CONCLUSIONES 178
CAPÍTULO 12: NEUROPLASTICIDAD Y ADAPTACIONES FUNCIONALES DEL SISTEMA NERVIOSO AL ENTRENAMIENTO. AUTOR: Lcda. Silvia Del Carmen Lozano Chaguay, Msc. 182
12.1. INTRODUCCIÓN 184
12.2. DESARROLLO 186

12.2.1. Concepto y tipos de neuroplasticidad. 186
12.2.2. Tipos de neuroplasticidad. 186
12.2.3. Mecanismos moleculares y celulares de la neuroplasticidad inducida por el entrenamiento 187
12.2.4. Cambios epigenéticos inducidos por el entrenamiento. 188
12.2.5. Oscilaciones neuronales y plasticidad. 188
12.2.6. Adaptaciones del sistema nervioso central al entrenamiento. 189
12.2.7. Adaptaciones del sistema nervioso periférico al entrenamiento 191
12.2.8. Neuroplasticidad y aprendizaje motor. 192
12.2.9. Neuroplasticidad y rehabilitación en deportistas con lesiones. 193
12.2.10. La plasticidad neural en la rehabilitación deportiva se basa en los principios de Kleim y Jones (2008): 194
12.2.11. Aplicaciones prácticas para entrenadores y deportistas. 195
12.2.12. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras. 196
12.3. CONCLUSIONES 197
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 198
PARTE V. 201
ÉTICA, LEGISLACIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS 201
CAPÍTULO 13: NEUROLOGÍA DE LAS LESIONES DEPORTIVAS Y SU IMPACTO EN EL RENDIMIENTO: AUTORA: Lcda. Yngrid Paola Espin Mancilla, Msc. 201
13.1. INTRODUCCIÓN 203
13.2. DESARROLLO 204
13.2.1. Fundamentos neurobiológicos del movimiento. 204
13.2.2. Función del sistema nervioso en el movimiento. 205
13.2.3. Control motor y aprendizaje en el deporte. 205
13.2.4. Principios del control motor. 205
13.2.5. Aplicaciones del control motor en el ámbito deportivo. 205
13.2.6. Clasificación de las lesiones deportivas con implicación neurológica. 206
13.2.7. Impacto neurológico en el rendimiento deportivo. 209
13.2.8. Impacto cognitivo. 209
13.2.9. Impacto psicológico y emocional. 210
13.2.10. Neuroplasticidad y rehabilitación neurológica. 210
13.2.11. Estrategias de rehabilitación basadas en neuroplasticidad. 211
13.2.12. Estrategias de prevención y entrenamiento neuromuscular. 212
13.2.13. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras. 213
13.3. CONCLUSIONES 214
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 214

CAPÍTULO 14: PRINCIPIOS Y APLICACIONES DE LA NEURORREHABILITACIÓN EN EL CONTEXTO DEPORTIVO: AUTORA: Lcda. Golda Geovanna López Bustamante, Ph. D 217
14.1. INTRODUCCIÓN 219
14.2. DESARROLLO 220
14.2.1. Fundamentos neurofisiológicos del movimiento humano. 220
14.2.2. Principio de neuroplasticidad y su relación con el deporte. 221
14.2.3. Neurorrehabilitación, atención y toma de decisiones en el deporte. 222
14.2.4. Neurorrehabilitación y coordinación motora. 222
14.2.5. Neurorrehabilitación y desarrollo de patrones de movimiento eficientes. 223
14.2.6. Aprendizaje motor y reaprendizaje del movimiento. 224
14.2.7. Neurorrehabilitación en lesiones musculoesqueléticas deportivas. 224
14.2.8. Impacto psicológico de la lesión y la neurorrehabilitación. 225
14.2.9. Conmoción cerebral y neurorrehabilitación deportiva. 225
14.2.10. Neurorrehabilitación y retorno progresivo al deporte. 226
14.2.11. Tecnología aplicada a la neurorrehabilitación deportiva. 227
14.2.12. Neurorrehabilitación y control postural en el deporte. 227
14.2.13. Prevención de lesiones desde la neurorrehabilitación. 228
14.2.14. Enfoque interdisciplinario y rol del pedagogo deportivo. 228
14.2.15. Neurorrehabilitación y rendimiento deportivo. 229
14.2.16. Ética y responsabilidad en la neurorrehabilitación deportiva. 229
14.2.17. Principios de la neurorrehabilitación aplicados al deporte. 230
14.3. CONCLUSIONES 231
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 232
CAPÍTULO 15: TERAPIAS COMPLEMENTARIAS BASADAS EN LA NEUROCIENCIA: ESTIMULACIÓN CEREBRAL PARA EL RENDIMIENTO Y LA RECUPERACIÓN DEPORTIVA: *Dr. Constantino Darroman Hall, Msc* 235
15.1. INTRODUCCIÓN 237
15.2. DESARROLLO 238
15.2.1. Fundamentos neurofisiológicos de la estimulación cerebral no invasiva. 238
15.2.2. Las técnicas de NIBS se dividen en dos grandes categorías: 238
15.2.3. Neuroplasticidad inducida por estimulación cerebral y aprendizaje motor. 241
15.2.4. Modulación de la excitabilidad corticospinal. 241
15.2.5. Evidencia metaanalítica sobre tDCS y rendimiento deportivo. 242
15.2.6. Aplicaciones de la estimulación cerebral en el rendimiento deportivo. 242
15.2.7. Optimización de la atención y la toma de decisiones. 243
15.2.8. Aplicaciones en la recuperación y rehabilitación de lesiones. 244
15.2.9. Protocolos específicos para deportistas. 246

15.2.10. Aplicaciones en deportes de precisión. 246
15.2.11. Estimulación transcraneal con ultrasonido focalizado (tFUS) y estimulación por interferencia temporal (TIS). 247
15.2.12. Limitaciones, desafíos metodológicos y consideraciones éticas. 247
15.2.13. Seguridad y efectos a largo plazo. 249
15.2.14. Perspectivas futuras y tecnologías emergentes. 249
15.3. CONCLUSIONES 250
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 252
CAPITULO 16: IMPLICACIONES ÉTICAS Y CONSIDERACIONES LEGALES EN EL USO DE TECNOLOGÍAS BASADAS EN NEUROCIENCIA EN EL DEPORTE: *Autor: Lcdo Juan Miguel Luperón Terry, Ph. D.* 254
16.1. INTRODUCCIÓN 256
16.2. DESARROLLO 257
16.2.1. Fundamentos neurocientíficos y tecnológicos en el deporte. 257
16.2.2. Principios éticos fundamentales. 257
16.2.3. Consentimiento informado y autonomía del deportista. 258
16.2.4. Privacidad y protección de datos neurofisiológicos. 259
16.2.5. Dopaje tecnológico y equidad competitiva 260
16.2.6. Riesgos físicos, psicológicos y efectos a largo plazo. 260
16.2.7. Responsabilidad legal de entrenadores y profesionales. 261
16.2.8. Regulación, políticas públicas y marco normativo. 261
16.2.9. Inclusión, equidad y acceso a neurotecnologías. 262
16.2.10. Desafíos éticos emergentes. 262
16.2.11. Aplicaciones prácticas y recomendaciones. 263
16.3. CONCLUSIONES 264
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 265
CAPÍTULO 17: REHABILITACIÓN DE LA MOTRICIDAD FINA Y GRUESA: FUNDAMENTOS TEÓRICOS, EVALUACIÓN E INTERVENCIONES EN TERAPIA OCUPACIONAL Y FISIOTERAPIA: *Dr. Constantino Darroman Hall. Msc.* 267
17.1. INTRODUCCIÓN 269
17.2. DESARROLLO 270
17.2.1. Fundamentos Teóricos de la Motricidad. 270
17.2.2. Definición y características de la motricidad gruesa. 271
17.2.3. Desarrollo motor normal. 272
17.2.4. Evaluación de la Función Motora. 272
17.2.5. Instrumentos de evaluación de motricidad gruesa. 273
17.2.6. Poblaciones que Requieren Rehabilitación. 273
17.2.7. Intervenciones en Terapia Ocupacional. 274

17.2.8. Intervenciones en Fisioterapia. 275
17.2.9. Evidencia Científica. 276
17.3. CONCLUSIONES 277
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 278

PARTE I. FUNDAMENTOS NEUROBIOLÓGICOS DEL MOVIMIENTO

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN A LA NEUROCIENCIA Y SU IMPORTANCIA EN EL ÁMBITO DEPORTIVO. Autora: Lcda. Mercedes Jessenia Gaibor Villegas, Msc.

INTRODUCCIÓN A LA NEUROCIENCIA Y SU IMPORTANCIA EN EL ÁMBITO DEPORTIVO

INTRODUCTION TO NEUROSCIENCE AND ITS IMPORTANCE IN THE SPORTS FIELD

AUTOR: Lcda. Mercedes Jessenia Gaibor Villegas, Msc.

CORREO: mgaiborv@utb.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0433-4603

Resumen

La neurociencia ha revolucionado la comprensión del rendimiento deportivo al demostrar que el movimiento, el aprendizaje, la toma de decisiones y la regulación emocional dependen de complejos procesos cerebrales. Este capítulo analiza los fundamentos neurofisiológicos del control motor, el papel de la neuroplasticidad en el aprendizaje de habilidades, la influencia de la atención, la percepción y la memoria motora en el desempeño, así como los mecanismos neurales de la motivación, el estrés competitivo y la fatiga mental. Se revisan las neurotecnologías aplicadas al deporte y su contribución al entrenamiento personalizado, y se abordan aspectos éticos y preventivos. Se concluye en la derivación de implicaciones prácticas para entrenadores y preparadores físicos, destacando la importancia de integrar el conocimiento neurocientífico en la planificación deportiva.

Palabras clave: neurociencia, deporte, control motor, neuroplasticidad, aprendizaje motor, atención, toma de decisiones, regulación emocional, fatiga mental, neurotecnología.

Abstract

Neuroscience has revolutionized our understanding of athletic performance by demonstrating that movement, learning, decision-making, and emotional regulation depend on complex brain processes. This chapter examines the neurophysiological foundations of motor control, the role of neuroplasticity in skill learning, the influence of attention, perception, and motor memory on performance, as well as the neural mechanisms of motivation, competitive stress, and mental fatigue. Neurotechnologies applied to sport and their contribution to personalized training are reviewed, and ethical and preventative considerations are addressed. Finally, practical implications for coaches and trainers are drawn, highlighting the importance of integrating neuroscience knowledge into sports planning.

Keywords: neuroscience, sport, motor control, neuroplasticity, motor learning, attention, decision-making, emotional regulation, mental fatigue, neurotechnology.

1.1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el deporte ha dejado de concebirse únicamente como una actividad física basada en la fuerza, la resistencia y la técnica, para convertirse en un campo de estudio multidisciplinario donde convergen la fisiología, la psicología, la biomecánica y, de manera cada vez más relevante, la neurociencia. Esta última disciplina, encargada de estudiar el sistema nervioso y el funcionamiento del cerebro, ha demostrado que el rendimiento deportivo no depende exclusivamente de las capacidades musculares, sino de complejos procesos neuronales que regulan la coordinación motora, la atención, la toma de decisiones, la regulación emocional y el aprendizaje de habilidades (Yarrow, Brown & Krakauer, 2009).

Diversas investigaciones han evidenciado que el cerebro de un atleta entrenado presenta diferencias funcionales y estructurales en comparación con el de una persona sedentaria, lo que confirma que el entrenamiento deportivo produce adaptaciones neuronales significativas, fenómeno conocido como neuroplasticidad (Park & Reuter-Lorenz, 2009). Estas adaptaciones permiten una mayor eficiencia en la ejecución de movimientos, una mejor gestión del estrés competitivo y una capacidad superior para procesar información en contextos dinámicos, como ocurre en la mayoría de disciplinas deportivas.

La aplicación de la neurociencia al deporte ha permitido comprender que habilidades como la concentración, la anticipación, la memoria motora y la toma de decisiones rápidas no son cualidades abstractas, sino funciones cerebrales entrenables que pueden optimizarse mediante metodologías específicas (Voss et al., 2010). En este sentido, el entrenamiento moderno comienza a incorporar estrategias basadas en el conocimiento del funcionamiento cerebral para potenciar no solo el cuerpo del atleta, sino también su mente.

El objetivo de este capítulo es analizar la importancia de la neurociencia en el ámbito deportivo desde una perspectiva integral, abordando los fundamentos neurofisiológicos del movimiento, el papel de la neuroplasticidad en el aprendizaje motor, la influencia de los procesos cognitivos y emocionales en el rendimiento, y las aplicaciones prácticas de estos conocimientos en el entrenamiento deportivo contemporáneo. También se consideran los aspectos éticos y las limitaciones actuales de la investigación en este campo.

1.2. DESARROLLO

Fundamentos neurofisiológicos del control motor en el deporte.

Cuando se analiza el rendimiento deportivo, es común enfocarse en el desarrollo muscular o en la preparación física del atleta. No obstante, cada movimiento que realiza el cuerpo es el resultado de un proceso previo que ocurre en el cerebro. Antes de correr, saltar o lanzar, el sistema nervioso organiza la acción y determina la forma más adecuada de ejecutarla. Desde esta perspectiva, el deporte no solo depende de la capacidad física, sino también de la eficiencia con la que el cerebro dirige el movimiento.

El control motor hace referencia a la habilidad del sistema nervioso para planificar, coordinar y ajustar los movimientos voluntarios según las demandas del entorno. Esta capacidad permite que las acciones sean precisas y adaptables, algo esencial en contextos deportivos donde las situaciones cambian constantemente. Para que esto ocurra, distintas áreas del cerebro colaboran entre sí, formando una red que posibilita respuestas rápidas y organizadas (Kandel et al., 2013).

Entre estas estructuras destaca la corteza motora, responsable de enviar las señales necesarias para activar los músculos. Sin embargo, el movimiento no surge de manera improvisada; requiere una preparación previa en la que intervienen otras zonas cerebrales encargadas de anticipar la acción. Esta preparación permite al deportista reaccionar con mayor rapidez, una ventaja significativa en disciplinas donde el tiempo de respuesta influye directamente en el desempeño (Miller & Cohen, 2001).

Asimismo, el cerebelo cumple una función reguladora al encargarse de la coordinación y el equilibrio. Su papel consiste en supervisar el movimiento mientras se ejecuta y corregir posibles errores casi de inmediato. Gracias a este mecanismo, es posible lograr gestos técnicos más controlados y reducir el riesgo de fallos durante la práctica deportiva (Manto et al., 2012).

Los ganglios basales contribuyen también en el aprendizaje motor, ya que facilitan que los movimientos practicados repetidamente se vuelvan automáticos. Esta automatización resulta beneficiosa porque disminuye el esfuerzo mental necesario para ejecutar ciertas acciones, permitiendo que el atleta dirija su atención hacia aspectos tácticos o estratégicos (Graybiel, 2008).

Por su parte, la médula espinal actúa como el canal de comunicación entre el cerebro y el resto del cuerpo, además de intervenir en respuestas reflejas que favorecen reacciones inmediatas. En muchos deportes, esta rapidez puede marcar una diferencia importante en el resultado.

Estudios de neuroimagen han demostrado que los atletas de alto rendimiento presentan lo que se conoce como eficiencia neural, es decir, la capacidad de ejecutar tareas motoras con menor activación cerebral en comparación con personas no entrenadas. Esto indica un uso más optimizado de los recursos neuronales, que se traduce en movimientos más precisos, coordinados y rápidos (Neubauer & Fink, 2009). Además, el entrenamiento constante mejora la sincronización entre neuronas motoras y aumenta la velocidad de conducción nerviosa, favoreciendo respuestas más eficaces ante estímulos externos (Enoka & Duchateau, 2017).

Desde esta perspectiva, el movimiento deportivo no es únicamente el resultado de la fuerza muscular, sino de la eficiencia con la que el sistema nervioso organiza y controla dicho movimiento. Por ello, comprender los fundamentos neurofisiológicos del control motor permite valorar la importancia del cerebro como elemento clave en el rendimiento deportivo y fundamenta la necesidad de integrar el conocimiento neurocientífico en los procesos de entrenamiento.

Tabla 1.

Estructuras cerebrales clave en el control motor y su función en el deporte.

Estructura cerebral	Función principal	Ejemplo en el deporte
Corteza motora	Generación de señales para la activación muscular	Un tenista ejecuta un golpe de derecha gracias a la activación de esta área
Corteza prefrontal	Planificación, toma de decisiones y control ejecutivo	Un futbolista decide si pasar o regatear basándose en la posición de los rivales
Cerebelo	Coordinación, equilibrio y corrección de errores	Un gimnasta ajusta su postura durante un salto para mantener el equilibrio
Ganglios basales	Automatización de movimientos y aprendizaje de hábitos	Un portero de fútbol realiza una parada de forma automática sin pensar en cada movimiento
Médula espinal	Transmisión de señales y reflejos rápidos	Un atleta retira la mano al sentir calor o dolor, protegiéndose de una lesión

1.2.1. Neuroplasticidad y aprendizaje motor

Uno de los aportes más importantes de la neurociencia al ámbito deportivo es la comprensión de la neuroplasticidad, entendida como la capacidad del cerebro para reorganizarse y formar nuevas conexiones neuronales en respuesta a la experiencia y al entrenamiento. En el deporte, este fenómeno explica cómo la práctica constante no solo fortalece los músculos, sino que modifica de manera significativa las redes neuronales responsables del movimiento, permitiendo que las habilidades técnicas se perfeccionen con el tiempo (Dayan & Cohen, 2011).

Cada vez que un atleta practica un gesto técnico —un lanzamiento, un salto o un desplazamiento—, el cerebro va fortaleciendo la comunicación entre las neuronas que participan en ese movimiento. Este proceso ocurre gracias a la repetición, que permite que las conexiones nerviosas se vuelvan más firmes y organizadas con el tiempo. Como resultado, la ejecución del movimiento se vuelve más fluida y requiere un menor esfuerzo mental (Doyon et al., 2009).

Durante las primeras etapas del aprendizaje, el deportista suele necesitar una gran concentración para controlar cada parte del movimiento. Esta exigencia implica una mayor activación de las áreas cerebrales relacionadas con la atención y el control consciente. Sin embargo, a medida que la práctica se vuelve constante, el cerebro optimiza sus recursos y delega parte del control a estructuras como el cerebelo y los ganglios basales, vinculadas con la automatización de habilidades. Por esta razón, los atletas con mayor experiencia pueden ejecutar gestos técnicos con naturalidad y precisión, sin tener que pensar en cada detalle.

La neuroplasticidad también confiere una notable capacidad de adaptación. El deportista no solo aprende movimientos nuevos, sino que también puede corregir errores y ajustar su técnica cuando las demandas del entorno cambian. Esta reorganización neuronal demuestra que el aprendizaje deportivo es un proceso dinámico, directamente influenciado por la capacidad del sistema nervioso para modificarse.

El entrenamiento no debe entenderse únicamente como repetición física, sino como un proceso continuo de fortalecimiento cerebral. La frecuencia y la calidad de la práctica influyen en la solidez de las conexiones neuronales que respaldan el desempeño, lo que confirma que la mejora técnica tiene una base claramente neurobiológica.

1.2.2. Atención, concentración y procesamiento cognitivo en el rendimiento deportivo.

La atención y la concentración son habilidades esenciales para el desempeño deportivo, ya que permiten al atleta enfocarse en los estímulos verdaderamente importantes y evitar distracciones que podrían afectar su rendimiento. Desde la neurociencia, la atención se explica como el resultado de la activación de redes neuronales específicas, principalmente en la corteza prefrontal y parietal, encargadas de regular cómo se procesa la información sensorial (Posner & Petersen, 1990).

En los contextos deportivos, donde las situaciones cambian de manera constante, mantener el enfoque resulta fundamental para responder con eficacia. Un atleta concentrado puede interpretar mejor lo que sucede a su alrededor, reaccionar con mayor rapidez y tomar decisiones más acertadas. Por el contrario, la falta de atención puede provocar errores que influyan directamente en el resultado.

Diversos estudios han demostrado que los deportistas presentan una mayor capacidad de atención sostenida y selectiva en comparación con personas no entrenadas, lo que sugiere que el ejercicio físico continuo contribuye al fortalecimiento de las redes neuronales responsables del enfoque cognitivo (Voss et al., 2010). Esto explica por qué los atletas experimentados cometen menos errores técnicos en momentos críticos, ya que logran mantener su concentración incluso bajo condiciones de estrés.

Por lo tanto, entrenar la concentración es tan importante como desarrollar las capacidades físicas. La práctica sistemática ayuda a mejorar el control atencional, favoreciendo un rendimiento más estable incluso en escenarios de presión.

1.2.3. Toma de decisiones, percepción y anticipación en el deporte

En el deporte competitivo, los atletas deben enfrentarse continuamente a situaciones imprevistas que exigen respuestas rápidas. Estas respuestas no dependen únicamente de la preparación física, sino también de procesos cognitivos como la percepción, la interpretación del entorno y la toma de decisiones en cuestión de segundos. Estas funciones se relacionan con la actividad de la corteza prefrontal, área cerebral asociada al razonamiento, la planificación y la evaluación de alternativas (Miller & Cohen, 2001).

Sin embargo, en el contexto deportivo, la toma de decisiones no puede basarse en un análisis lento y consciente. Los deportistas expertos desarrollan la capacidad de responder casi de manera automática ante determinadas situaciones, gracias a la experiencia acumulada y a la

consolidación de patrones en la memoria motora y perceptiva. Yarrow, Brown y Krakauer (2009) explican que esta habilidad se fundamenta en el reconocimiento rápido de situaciones similares a experiencias previas, lo que permite al cerebro anticipar lo que ocurrirá y actuar con rapidez.

La percepción visual cumple un rol determinante dentro de este proceso. Los deportistas entrenados suelen desarrollar una mayor sensibilidad para detectar señales corporales sutiles en sus oponentes (cambios de postura o dirección) que les ayudan a prever lo que ocurrirá. Lejos de ser una habilidad innata, esta capacidad es el resultado de la adaptación neuronal generada por la práctica constante.

La anticipación, en consecuencia, se convierte en una ventaja competitiva significativa. Prever una acción otorga más tiempo para preparar la respuesta motora, aumentando la eficacia del movimiento. Esta habilidad depende del fortalecimiento de las redes neuronales que integran percepción, memoria y acción.

Comprender este proceso resalta la importancia de incluir en el entrenamiento ejercicios que estimulen la percepción, la lectura del juego y la toma de decisiones bajo presión, ya que estas capacidades tienen una base neurocientífica clara que puede desarrollarse con la práctica.

1.2.4. Memoria motora y automatización de habilidades deportivas.

La memoria motora es una forma de memoria implícita que permite almacenar y ejecutar secuencias de movimiento sin necesidad de supervisión consciente permanente. En el ámbito deportivo, esta capacidad resulta clave, ya que posibilita realizar gestos técnicos con rapidez y precisión incluso en momentos de alta tensión. Desde la neurociencia, se ha identificado que este tipo de memoria se consolida principalmente en estructuras como el cerebelo y los ganglios basales, responsables de la coordinación y la automatización del movimiento (Doyon et al., 2009).

En las fases iniciales del aprendizaje, el deportista debe concentrarse intensamente en cada etapa de la acción. No obstante, la repetición sistemática permite que el cerebro optimice las rutas neuronales implicadas, reduciendo progresivamente el esfuerzo mental necesario para ejecutar el movimiento (Dayan & Cohen, 2011).

Este fenómeno explica por qué los atletas experimentados pueden ejecutar movimientos técnicos con fluidez sin pensar deliberadamente en cada paso. Por ejemplo, un portero de fútbol

no analiza conscientemente cómo lanzarse para detener un balón; su cuerpo responde de manera automática gracias a la consolidación de la memoria motora. Esta automatización permite liberar recursos mentales que pueden destinarse a la estrategia, la anticipación y la toma de decisiones.

La automatización de habilidades no solo mejora la eficiencia del movimiento, sino que también reduce la probabilidad de cometer errores bajo presión. Cuando una acción está profundamente consolidada en la memoria motora, es menos susceptible a interferencias externas como el estrés, el ruido o la fatiga.

1.2.5. Regulación emocional, sistema límbico y estrés competitivo.

El rendimiento deportivo no depende únicamente de la capacidad física y técnica del atleta, sino también de su habilidad para manejar las emociones que surgen durante la competencia. Situaciones como la presión del público, la importancia del resultado o el miedo a cometer errores generan respuestas emocionales que pueden influir positiva o negativamente en el desempeño. Desde la neurociencia, estas reacciones están relacionadas con la actividad del sistema límbico, especialmente de la amígdala, estructura encargada de procesar emociones como el miedo, la ansiedad y el estrés (LeDoux, 2000).

Cuando un deportista experimenta niveles elevados de ansiedad, la activación excesiva de la amígdala puede interferir con la coordinación motora y la toma de decisiones, afectando la precisión de los movimientos. Esto explica por qué, en momentos de alta presión, algunos atletas cometen errores que normalmente no cometerían en condiciones de entrenamiento. La corteza prefrontal, encargada del control racional y la regulación del comportamiento, cumple un papel fundamental al moderar estas respuestas emocionales (Miller & Cohen, 2001).

Diversos estudios señalan que los atletas que desarrollan habilidades de regulación emocional logran mantener un equilibrio entre activación fisiológica y control cognitivo, lo que favorece un rendimiento más estable. Técnicas como la respiración controlada, la visualización mental y la atención plena ayudan a disminuir la activación excesiva del sistema límbico, permitiendo que el deportista conserve la calma y la claridad mental durante la competencia (Gross, 2015; Tang, Hölzel & Posner, 2015).

El manejo emocional también influye directamente en la confianza y la motivación del atleta. Mantener un estado emocional equilibrado permite enfrentar los errores como oportunidades

de mejora y no como fracasos, favoreciendo la continuidad del rendimiento a lo largo de la competencia.

En este sentido, el entrenamiento emocional debe entenderse como un componente esencial de la preparación deportiva. Conocer la base neurocientífica de las emociones facilita la creación de estrategias orientadas a controlar el estrés competitivo y a potenciar el desempeño en escenarios de alta exigencia.

1.2.6. Motivación, dopamina y rendimiento deportivo.

La motivación es uno de los motores fundamentales del rendimiento deportivo, ya que impulsa al atleta a entrenar con constancia, superar dificultades y buscar la mejora continua. Desde la perspectiva neurocientífica, la motivación está estrechamente relacionada con la actividad de ciertos neurotransmisores, especialmente la dopamina, sustancia química asociada al placer, la recompensa y el refuerzo de conductas (Wise, 2004).

Cuando un deportista alcanza un objetivo, mejora su rendimiento o recibe reconocimiento, el cerebro libera dopamina, generando una sensación de satisfacción. Esta respuesta no solo produce bienestar momentáneo, sino que también fortalece el deseo de repetir aquellas acciones que condujeron al logro. De esta manera, se activa un circuito de recompensa que favorece la perseverancia y el compromiso con el entrenamiento.

La dopamina no solo interviene en la sensación de placer, sino también en la capacidad de mantener el esfuerzo a lo largo del tiempo. Cuando este sistema funciona de manera adecuada, el atleta experimenta mayor disposición para enfrentar rutinas exigentes y tolerar el cansancio físico y mental. Por el contrario, niveles bajos de motivación pueden estar asociados a una disminución en la activación de este circuito neuronal.

Además, la forma en que el entrenador establece objetivos y proporciona retroalimentación influye directamente en este sistema de recompensa. Metas claras, alcanzables y progresivas, junto con refuerzos positivos, estimulan la liberación de dopamina y fortalecen la motivación intrínseca del deportista.

Comprender el papel de la motivación desde una perspectiva neurocientífica permite reconocer que el éxito deportivo no depende únicamente del talento o la preparación física, sino también de los procesos internos que impulsan al atleta a continuar superándose.

1.2.7. Fatiga mental y su impacto en el desempeño físico.

Tradicionalmente, el cansancio en el deporte se ha asociado casi exclusivamente al agotamiento muscular. Sin embargo, la neurociencia ha demostrado que el cerebro también experimenta fatiga y que esta tiene un impacto directo en el rendimiento físico. La fatiga mental se produce cuando las funciones cognitivas, como la atención, la concentración y la toma de decisiones, se ven sobrecargadas durante períodos prolongados de actividad, afectando la capacidad del atleta para mantener un desempeño óptimo (Marcora, Staiano & Manning, 2009).

Cuando el cerebro se encuentra fatigado, aumenta la percepción del esfuerzo físico, lo que provoca que el deportista sienta que la actividad requiere más energía de la que realmente demanda. Este fenómeno se traduce en una disminución anticipada del rendimiento, errores técnicos y menor capacidad de reacción ante estímulos del entorno. Es decir, aunque los músculos aún puedan responder adecuadamente, el cerebro limita el desempeño.

La corteza prefrontal, encargada del control cognitivo y la toma de decisiones, es una de las regiones más afectadas por la fatiga mental. Su disminución funcional repercute en la precisión de los movimientos y en la capacidad para mantener la concentración durante la competencia. Esto explica por qué, en etapas finales de un partido o competencia, los errores suelen incrementarse no solo por el cansancio físico, sino también por el agotamiento cognitivo.

Este conocimiento ha llevado a replantear la planificación del entrenamiento deportivo, incorporando períodos de descanso cognitivo y estrategias que favorezcan la recuperación mental del atleta. Actividades como el sueño adecuado, la relajación y la disminución de estímulos estresantes permiten restaurar la capacidad del sistema nervioso para sostener el rendimiento (Fullagar et al., 2015).

Por tanto, reconocer la existencia de la fatiga mental permite comprender que el rendimiento deportivo depende tanto de la resistencia física como de la capacidad del cerebro para mantener sus funciones cognitivas en condiciones óptimas.

1.2.8. Neurotecnologías aplicadas al deporte.

El avance de la neurociencia ha permitido el desarrollo de diversas neurotecnologías que hoy se aplican en el ámbito deportivo para comprender, medir y optimizar el rendimiento del atleta. Estas herramientas permiten observar en tiempo real la actividad cerebral, analizar patrones

cognitivos y diseñar entrenamientos más precisos basados en el funcionamiento del sistema nervioso (Pineda, 2005).

Una de las tecnologías más utilizadas es el electroencefalograma (EEG) , que registra la actividad eléctrica del cerebro. Mediante este instrumento, es posible identificar los niveles de concentración, atención y activación mental del deportista durante el entrenamiento y la competencia. Esto ha permitido comprobar que los atletas de alto rendimiento presentan patrones cerebrales específicos asociados a estados de máxima concentración y control emocional.

Otra herramienta innovadora es el neurofeedback, técnica que permite al deportista observar su propia actividad cerebral y aprender a regularla de manera consciente. A través de esta retroalimentación, el atleta puede entrenar su mente para alcanzar estados óptimos de concentración, reducir la ansiedad y mejorar su control atencional. Estudios han demostrado que el neurofeedback favorece el rendimiento en deportes que requieren alta precisión y control mental, como el tiro deportivo, el golf y el tenis (Gruzelier, 2014).

Asimismo, la resonancia magnética funcional (fMRI) ha permitido estudiar qué áreas del cerebro se activan durante la ejecución de movimientos deportivos, facilitando la comprensión del aprendizaje motor y la coordinación. Gracias a estos estudios, se ha confirmado que la repetición del movimiento no solo fortalece los músculos, sino también las redes neuronales implicadas en la acción.

También se han incorporado dispositivos portátiles que miden variables fisiológicas relacionadas con la actividad cerebral, como la variabilidad de la frecuencia cardíaca, la cual está vinculada al equilibrio entre el sistema nervioso simpático y parasimpático. Esta información permite evaluar el nivel de estrés y recuperación del atleta.

El uso de estas neurotecnologías ha transformado la manera de entrenar, ya que ahora no solo se evalúa el desempeño físico, sino también el estado cognitivo y emocional del deportista. De esta forma, el entrenamiento se vuelve más integral, personalizado y científicamente fundamentado.

1.2.9. Sueño, recuperación cerebral y rendimiento deportivo.

El sueño es uno de los procesos biológicos más importantes para la recuperación del deportista, no solo a nivel físico, sino especialmente a nivel cerebral. Durante el descanso nocturno, el

cerebro realiza funciones esenciales de reparación, reorganización neuronal y consolidación de la memoria, aspectos fundamentales para el aprendizaje motor y el rendimiento deportivo (Walker & Stickgold, 2006).

La neurociencia ha demostrado que mientras el cuerpo descansa, el cerebro permanece altamente activo. En las fases profundas del sueño, se fortalecen las conexiones neuronales formadas durante el entrenamiento, permitiendo que los movimientos aprendidos se consoliden y se automaticen. Este proceso es clave para que el deportista mejore su técnica sin necesidad de repetir físicamente el ejercicio.

Además, el sueño regula la actividad de neurotransmisores como la dopamina y la serotonina, responsables del estado de ánimo, la motivación y la concentración. Cuando un atleta duerme pocas horas o tiene un sueño de mala calidad, se altera este equilibrio químico, lo que repercute en su capacidad de atención, toma de decisiones y control emocional durante la competencia (Fullagar et al., 2015).

La privación del sueño también incrementa la percepción del esfuerzo y favorece la aparición de la fatiga mental. Esto significa que un deportista mal descansado puede experimentar mayor cansancio incluso antes de iniciar la actividad física, afectando su rendimiento desde el inicio.

Por esta razón, en el entrenamiento moderno se considera al sueño como una parte esencial del plan de preparación del atleta. Los entrenadores y preparadores físicos recomiendan rutinas de descanso adecuadas, horarios regulares y la reducción de estímulos antes de dormir para favorecer una recuperación cerebral óptima.

En definitiva, el sueño no es un tiempo perdido, sino un proceso activo donde el cerebro consolida el aprendizaje, restaura sus funciones y prepara al deportista para un mejor desempeño.

1.2.10. Aplicaciones prácticas de la neurociencia en el entrenamiento deportivo

Los aportes de la neurociencia no se limitan al plano teórico, sino que tienen aplicaciones directas y concretas en la planificación y ejecución del entrenamiento deportivo. Comprender cómo funciona el cerebro permite diseñar estrategias que optimizan el aprendizaje, mejoran la técnica y favorecen el rendimiento del atleta de manera más eficiente (Schmidt & Lee, 2011).

Una de las principales aplicaciones es la organización del entrenamiento en sesiones cortas y variadas que eviten la sobrecarga cognitiva. La repetición excesiva de un mismo ejercicio puede generar fatiga mental y disminuir la capacidad de aprendizaje. Por ello, alternar tareas, introducir variabilidad y establecer pausas estratégicas favorece la consolidación neuronal y mantiene la atención del deportista.

Otra aplicación importante es el uso de la práctica mental o visualización como complemento del entrenamiento físico. Imaginar la ejecución correcta de un movimiento activa las mismas áreas cerebrales que participan en la acción real, fortaleciendo las redes neuronales implicadas en el gesto deportivo. Esta técnica ha demostrado ser eficaz en la mejora de la precisión, la coordinación y la confianza del atleta (Jeannerod, 2001).

Asimismo, la retroalimentación inmediata y específica que proporciona el entrenador resulta clave desde el enfoque neurocientífico. Cuando el deportista recibe información clara sobre su desempeño, el cerebro puede ajustar y corregir el movimiento con mayor rapidez, facilitando el aprendizaje motor.

La neurociencia también respalda la importancia de entrenar en contextos similares a la competencia. Simular situaciones reales activa procesos cognitivos relacionados con la toma de decisiones, la atención selectiva y el control emocional, preparando al cerebro para responder adecuadamente en escenarios competitivos.

En este sentido, se ha comprobado que un ambiente de entrenamiento positivo, donde exista confianza y motivación, favorece la liberación de neurotransmisores que potencian el aprendizaje y el rendimiento. De esta manera, la neurociencia contribuye a entender que el entorno psicológico es tan importante como el físico en la preparación deportiva.

1.2.11. Neurociencia y prevención de lesiones deportivas.

La prevención de lesiones deportivas no depende únicamente de la condición física del atleta, sino también del adecuado funcionamiento del sistema nervioso. La neurociencia ha demostrado que muchos movimientos incorrectos, descoordinaciones y reacciones tardías que terminan en lesiones tienen su origen en fallas en el control neuromotor y en los procesos cerebrales que regulan el movimiento (Proske & Gandevia, 2012).

El cerebro recibe constantemente información del cuerpo a través de los sistemas propioceptivo y sensorial. Esta información permite ajustar la postura, el equilibrio y la coordinación en

tiempo real. Cuando estos mecanismos no funcionan de manera óptima, el deportista puede ejecutar movimientos inadecuados sin ser consciente de ello, aumentando el riesgo de lesiones musculares, articulares o ligamentarias.

Por esta razón, en la actualidad se incluyen en los entrenamientos ejercicios que estimulan la propiocepción y el equilibrio, como trabajos en superficies inestables, cambios de dirección y ejercicios de coordinación. Estas prácticas fortalecen las conexiones neuronales encargadas del control postural y la respuesta motora rápida ante imprevistos.

Asimismo, la fatiga mental también se relaciona con un mayor riesgo de lesión. Cuando el cerebro está agotado, disminuye la precisión de los movimientos y la capacidad de reacción, lo que puede generar errores técnicos peligrosos durante la actividad física. Esto demuestra que la prevención de lesiones también implica cuidar el estado cognitivo del atleta.

La neurociencia ha permitido comprender que la rehabilitación posterior a una lesión debe enfocarse no solo en la recuperación del tejido dañado, sino también en la reeducación neuromotora. Es necesario que el cerebro reaprenda el patrón correcto del movimiento para evitar recaídas.

En consecuencia, integrar principios neurocientíficos en la preparación física contribuye significativamente a reducir el riesgo de lesiones y a mejorar la seguridad del deportista durante el entrenamiento y la competencia.

1.2.12. Aspectos éticos en el uso de neurociencia y neurotecnologías en el deporte.

El creciente uso de neurotecnologías en el deporte (como la estimulación cerebral no invasiva (tDCS, rTMS), el neurofeedback y las interfaces cerebro-computadora) plantea importantes desafíos éticos que deben ser considerados (Davis, 2014). Estos desafíos incluyen la protección de la autonomía del deportista, el consentimiento informado, la privacidad de los datos cerebrales y la equidad competitiva.

El consentimiento informado es un requisito fundamental. Los deportistas deben comprender plenamente los riesgos, beneficios y posibles efectos secundarios de cualquier intervención neurotecnológica antes de aceptar participar. Especial atención merecen los atletas menores de edad, donde la decisión debe ser tomada conjuntamente con los tutores legales y siempre priorizando el bienestar del joven (Farah, 2015).

La privacidad y protección de datos neurofisiológicos es otro aspecto crítico. La información sobre la actividad cerebral de un atleta es altamente sensible y podría ser utilizada de manera indebida para obtener ventajas competitivas, discriminar o manipular al deportista. Por ello, se deben establecer protocolos estrictos de almacenamiento y acceso, en consonancia con normativas internacionales como el GDPR (Bastianon, 2021).

El dopaje tecnológico (o neurodopaje) se refiere al uso de neurotecnologías para obtener una ventaja competitiva injusta. Aunque la WADA aún no ha prohibido explícitamente estas técnicas, el debate ético está en curso, y algunos autores consideran que ciertas formas de estimulación cerebral podrían infringir el espíritu deportivo (Chmiel, 2025). Es necesario que los organismos reguladores establezcan criterios claros sobre qué tecnologías son aceptables y cuáles constituyen una forma de dopaje.

La equidad en el acceso a estas tecnologías también es una preocupación ética. Si solo los atletas con mayores recursos económicos pueden acceder a neurotecnologías avanzadas, se generan desigualdades que contradicen los principios de justicia y equidad en el deporte (Iván, 2020). Por ello, se recomienda que las instituciones deportivas promuevan un acceso equitativo y regulado.

1.2.13. Limitaciones de la investigación actual y futuras direcciones.

A pesar de los avances en la neurociencia del deporte, existen limitaciones importantes que deben ser consideradas:

- Tamaños muestrales reducidos: La mayoría de los estudios se han realizado con muestras pequeñas, lo que limita la generalización de los hallazgos a poblaciones atléticas diversas (Yarrow et al., 2009).
- Falta de estudios longitudinales: Se necesitan investigaciones que sigan a los atletas durante períodos prolongados para evaluar los efectos a largo plazo del entrenamiento neurológico y de las neurotecnologías.
- Variabilidad individual: No se han analizado suficientemente las diferencias en la respuesta neurológica al entrenamiento según la edad, el sexo, la genética o el nivel de condición física.
- Efectos a largo plazo de las neurotecnologías: Aún no se conocen completamente los posibles efectos adversos de la estimulación cerebral repetida en atletas sanos.

Validez ecológica: Muchos estudios se realizan en condiciones de laboratorio que no reflejan la complejidad de los contextos deportivos reales.

1.2.14. Futuras líneas de investigación deberían explorar:

1. El desarrollo de protocolos de entrenamiento personalizados basados en perfiles neurofisiológicos individuales.
2. La integración de neurotecnologías portátiles en el entrenamiento diario para monitorizar la fatiga mental y el estado cognitivo.
3. El estudio de los mecanismos epigenéticos que subyacen a la neuroplasticidad inducida por el deporte.
4. La evaluación de los efectos combinados de la actividad física, la nutrición y el sueño sobre la función cerebral y el rendimiento deportivo.

1.3. CONCLUSIONES

La neurociencia ha demostrado que el rendimiento deportivo no depende únicamente de la fuerza muscular, la resistencia física o la técnica adquirida mediante la repetición, sino del funcionamiento integral del sistema nervioso que coordina, regula y optimiza cada movimiento, decisión y respuesta emocional del deportista. A lo largo del desarrollo del presente capítulo se evidenció que el cerebro cumple un papel central en el control motor, el aprendizaje, la atención, la motivación y la gestión del estrés, factores que determinan el desempeño dentro y fuera de la competencia.

Los fundamentos neurofisiológicos del control motor permitieron comprender que cada gesto deportivo es el resultado de complejas redes neuronales que integran información sensorial, propioceptiva y cognitiva. Esta visión supera la idea tradicional del entrenamiento basado solo en la repetición mecánica, mostrando que la calidad del aprendizaje depende de cómo el cerebro procesa, organiza y consolida la información motora. En este sentido, la neuroplasticidad se presenta como el mecanismo que posibilita la mejora continua del rendimiento, al fortalecer las conexiones neuronales con la práctica adecuada y consciente.

Asimismo, se analizó cómo procesos cognitivos como la atención, la toma de decisiones y la concentración influyen directamente en la ejecución deportiva. La fatiga mental, el estrés competitivo y las emociones mal gestionadas pueden deteriorar el desempeño aun cuando la condición física sea óptima. Esto confirma que el entrenamiento deportivo debe considerar el cuidado del estado cognitivo y emocional del atleta como parte esencial de su preparación.

La motivación, explicada desde la liberación de neurotransmisores como la dopamina, permitió comprender por qué el refuerzo positivo, los objetivos claros y el entorno de entrenamiento influyen significativamente en la disciplina y constancia del deportista. De igual manera, el sueño y la recuperación cerebral se evidencian como procesos activos donde el cerebro consolida el aprendizaje motor y restablece su equilibrio químico y funcional.

Las aplicaciones prácticas de la neurociencia, junto con el uso de neurotecnologías, muestran que actualmente es posible evaluar y entrenar no solo el cuerpo, sino también el cerebro del atleta. Estas herramientas permiten personalizar el entrenamiento, prevenir lesiones mediante la mejora del control neuromotor y optimizar el rendimiento desde una perspectiva integral.

No obstante, el uso de estas tecnologías debe ir acompañado de un marco ético sólido que garantice el consentimiento informado, la privacidad de los datos y la equidad competitiva. La regulación y la educación en neuroética son esenciales para que los avances científicos beneficien a todos los deportistas sin generar desigualdades o riesgos innecesarios.

En ese sentido, se reconoce que la investigación en neurociencia deportiva aún enfrenta limitaciones metodológicas y necesita estudios con diseños más robustos, muestras más amplias y seguimientos a largo plazo. No obstante, el potencial de este campo para transformar el entrenamiento, la prevención de lesiones y el bienestar del deportista es inmenso. Integrar el conocimiento neurocientífico en la formación de entrenadores y profesionales del deporte constituye un paso necesario para construir un deporte más científico, consciente y humano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bastianon, S. (2021). Hacia una cultura de salvaguardia: perspectivas comparadas y el camino por recorrer. *Sports Law and Policy Centre*. https://www.sportslawandpolicycentre.com/SAFEGUARDING_ES.pdf

Chmiel, J. (2025). Transcranial direct current stimulation (tDCS): A new, (still) legal form of "neurodoping" in sports? *Advances in Clinical and Experimental Medicine*. Publicación electrónica anticipada.

Davis, N. J. (2014). The ethics of using brain stimulation in sport. *Journal of the Philosophy of Sport, 41*(2), 177-191. https://doi.org/10.1080/00948705.2013.858622

Dayan, E., & Cohen, L. G. (2011). Neuroplasticity subserving motor skill learning. *Neuron, 72*(3), 443-454. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.008

Doyon, J., Bellec, P., Amsel, R., Penhune, V., Monchi, O., Carrier, J., Lehéricy, S., & Benali,

H. (2009). Contributions of the basal ganglia and cerebellum to motor learning. *NeuroImage*, *45*(1), 113-124. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.11.051

Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2017). Neuromuscular adaptations to training. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, *7*(6), a029769. https://doi.org/10.1101/cshperspect.a029769

Farah, M. J. (2015). The ethics of cognitive enhancement. *Science*, *350*(6263), 840-841. https://doi.org/10.1126/science.aad3286

Fullagar, H. H. K., Skorski, S., Duffield, R., Hammes, D., Coutts, A. J., & Meyer, T. (2015). Sleep and athletic performance: the effects of sleep loss on exercise performance, and physiological and cognitive responses to exercise. *Sports Medicine*, *45*(2), 161-186. https://doi.org/10.1007/s40279-014-0260-0

Graybiel, A. M. (2008). Habits, rituals, and the evaluative brain. *Annual Review of Neuroscience*, *31*, 359-387. https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.29.051605.112851

Gross, J. J. (2015). Emotion regulation: current status and future prospects. *Psychological Inquiry*, *26*(1), 1-26. https://doi.org/10.1080/1047840X.2014.940781

Gruzelier, J. H. (2014). EEG-neurofeedback for optimising performance in sport. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *44*, 124-141. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.11.003

Iván, A. M. (2020). Neurociencia y entrenamiento en el deporte de alto rendimiento. *Revista Iberoamericana de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, *8*(2), 79-90. https://doi.org/10.24310/riccafd.2019.v8i2.669

Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage*, *14*(1), S103-S109. https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0832

Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S., & Hudspeth, A. (2013). *Principles of neural science* (5th ed.). McGraw-Hill.

LeDoux, J. (2000). Emotion circuits in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, *23*, 155-184. https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.23.1.155

Manto, M., Bower, J. M., Conforto, A. B., Delgado-García, J. M., da Guarda, S. N. F., Gerwig, M., Habas, C., Hagura, N., Ivry, R. B., Mariën, P., Molinari, M., Naito, E., Nowak, D. A., Oulad Ben Taib, N., Pelisson, D., Tesche, C. D., Tilikete, C., & Timmann, D. (2012). Consensus paper: roles of the cerebellum in motor control. *The Cerebellum*, *11*(2), 457-487. https://doi.org/10.1007/s12311-011-0301-3

Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. *Journal of Applied Physiology, 106*(3), 857-864. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.91324.2008

Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience, 24*, 167-202. https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167

Neubauer, A. C., & Fink, A. (2009). Intelligence and neural efficiency: measures of brain activation versus measures of functional connectivity in the brain. *Intelligence, 37*(2), 223-234. https://doi.org/10.1016/j.intell.2008.10.001

Park, D. C., & Reuter-Lorenz, P. A. (2009). The adaptive brain: aging and neurocognitive scaffolding. *Annual Review of Psychology, 60*, 173-196. https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093656

Pineda, J. A. (2005). The functional significance of mu rhythms: translating "seeing" and "hearing" into "doing". *International Journal of Psychophysiology, 55*(1), 5-12. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2004.07.005

Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience, 13*, 25-42. https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325

Proske, U., & Gandevia, S. C. (2012). The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiological Reviews, 92*(4), 1651-1697. https://doi.org/10.1152/physrev.00048.2011

Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2011). *Motor learning and performance* (5th ed.). Human Kinetics.

Tang, Y. Y., Hölzel, B. K., & Posner, M. I. (2015). The neuroscience of mindfulness meditation. *Nature Reviews Neuroscience, 16*(4), 213-225. https://doi.org/10.1038/nrn3916

Voss, M. W., Kramer, A. F., Basak, C., Prakash, R. S., & Roberts, B. (2010). Are expert athletes 'expert' in the cognitive laboratory? A meta-analytic review of cognition and sport expertise. *Journal of Sport & Exercise Psychology, 32*(1), 1-20.

Walker, M. P., & Stickgold, R. (2006). Sleep, memory, and plasticity. *Annual Review of Psychology, 57*, 139-166. https://doi.org/10.1146/annurev.psych.56.091103.070307

Wise, R. A. (2004). Dopamine, learning and motivation. *Nature Reviews Neuroscience, 5*(6), 483-494. https://doi.org/10.1038/nrn1406

Yarrow, K., Brown, P., & Krakauer, J. W. (2009). Inside the brain of an elite athlete: the

neural processes that support high achievement in sports. *Nature Reviews Neuroscience, 10*(8), 585-596. https://doi.org/10.1038/nrn2678

CAPITULO 2: ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL SISTEMA NERVIOSO: CAPITULO Autora: Lcda. Golda López Bustamante, Ph.D.

ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL SISTEMA NERVIOSO

STRUCTURE AND BASIC FUNCTIONING OF THE NERVOUS SYSTEM

AUTORA: Lcda. Golda López Bustamante, Ph.D.

ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8173-2400

CORREO*:* glopezb@utb.edu.ec

Resumen

El sistema nervioso constituye la base biológica del movimiento humano, ya que permite la percepción del entorno, la planificación de acciones y la ejecución coordinada de los movimientos. Este capítulo revisa la estructura y funcionamiento básico del sistema nervioso, con especial énfasis en su papel en la actividad física y el deporte. Se describen las principales divisiones del sistema nervioso (central y periférico, autónomo), las estructuras cerebrales implicadas en el control motor (corteza motora, ganglios basales, cerebelo, lóbulo parietal y frontal), y la comunicación entre el sistema nervioso y los músculos a través de la médula espinal y la unión neuromuscular. Además, se analiza cómo el entrenamiento y la práctica repetida inducen cambios plásticos en el sistema nervioso (neuroplasticidad) que optimizan la coordinación, la precisión y la velocidad de los movimientos. Se derivan aplicaciones prácticas para el diseño de programas de entrenamiento que estimulen tanto el sistema nervioso como el sistema muscular, promoviendo un rendimiento deportivo seguro y eficiente.

Palabras clave: sistema nervioso, control motor, neuroplasticidad, deporte, aprendizaje motor, coordinación.

Abstract

The nervous system forms the biological basis of human movement, enabling the perception of the environment, the planning of actions, and the coordinated execution of movements. This chapter reviews the basic structure and function of the nervous system, with particular emphasis on its role in physical activity and sport. The main divisions of the nervous system (central, peripheral, and autonomic) are described, as are the brain structures involved in motor control (motor cortex, basal ganglia, cerebellum, parietal and frontal lobes), and the communication between the nervous system and muscles via the spinal cord and neuromuscular junction. Furthermore, the chapter analyzes how training and repeated practice induce plastic changes in the nervous system (neuroplasticity) that optimize the coordination, accuracy, and speed of movements. Practical applications are derived for the design of training programs

that stimulate both the nervous and muscular systems, promoting safe and efficient athletic performance.

Keywords: nervous system, motor control, neuroplasticity, sport, motor learning, coordination.

2.1. INTRODUCCIÓN

El sistema nervioso es el encargado de que los músculos del cuerpo se muevan de manera coordinada y controlada. Esta función resulta fundamental durante la práctica de ejercicio físico o deporte, ya que permite captar información del entorno, procesarla y reaccionar rápidamente, asegurando que los movimientos sean seguros, precisos y efectivos (Vélez, 2023; Kandel et al., 2021). Conocer cómo funciona el sistema nervioso y cómo se conecta con los músculos es esencial para comprender el aprendizaje motor, mejorar el rendimiento deportivo y prevenir lesiones (Schmidt & Lee, 2019). La comunicación continua entre el cerebro, la médula espinal y los músculos hace posible que cada acción se ajuste en el momento justo, ayudando a aumentar la fuerza, la coordinación y la precisión de los gestos físicos (Purves et al., 2018).

El objetivo principal de este capítulo es explorar cómo el sistema nervioso influye en la activación, el control y la recuperación de los músculos, mostrando cómo la planificación de los movimientos, la retroalimentación sensorial y la práctica constante pueden mejorar el rendimiento en el deporte. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir la organización estructural del sistema nervioso; (2) explicar el papel de las principales áreas cerebrales en el control motor; (3) analizar la comunicación entre el sistema nervioso y los músculos; (4) discutir los mecanismos de neuroplasticidad inducidos por el entrenamiento; y (5) derivar recomendaciones prácticas para el diseño de programas de entrenamiento que estimulen el sistema nervioso.

2.2. DESARROLLO

2.2.1. Organización del sistema nervioso

2.2.1.1. División general

El sistema nervioso está formado por una compleja red de neuronas cuya función principal es producir, regular y transmitir información entre las distintas partes del cuerpo humano (Vélez, 2023). Gracias a esta capacidad, el sistema nervioso cumple funciones esenciales como el control de los procesos vitales (latido cardíaco, respiración, digestión), la percepción sensorial y la ejecución de los movimientos corporales. En conjunto, las estructuras del sistema nervioso

dirigen aspectos fundamentales de la condición humana, como la conciencia, la cognición, la conducta y la memoria (Kandel et al., 2021).

El sistema nervioso se divide en dos grandes subsistemas (Purves et al., 2018):

- Sistema nervioso central (SNC): Compuesto por el encéfalo (cerebro, cerebelo y tronco encefálico) y la médula espinal. Es el centro de integración y procesamiento de la información.
- Sistema nervioso periférico (SNP): Formado por los nervios y ganglios que conectan el SNC con el resto del cuerpo. Se subdivide en sistema nervioso somático (control voluntario de los músculos esqueléticos) y sistema nervioso autónomo (control involuntario de órganos internos).
- Sistema nervioso autónomo: El sistema nervioso autónomo (SNA) regula funciones internas sin que la persona tenga que pensar en ellas, como la presión arterial, la frecuencia respiratoria y otras actividades vitales (Coon, 2025). Su acción es involuntaria y automática, manteniendo el equilibrio del cuerpo (homeostasis) y respondiendo a las necesidades del entorno.

El SNA se divide en dos partes complementarias (Guyton & Hall, 2021):

Sistema simpático: Prepara al cuerpo para la acción (respuesta de "lucha o huida"). Durante el ejercicio, activa procesos como el aumento de la frecuencia cardíaca, la dilatación de las vías respiratorias y la movilización de energía.

Sistema parasimpático: Calma y recupera el cuerpo (respuesta de "descanso y digestión"). Favorece el descanso, la recuperación y la conservación de energía.

El SNA depende de vías formadas por dos neuronas: la primera se encuentra en el tronco encefálico o la médula espinal, y la segunda en un ganglio autónomo. En el sistema simpático, los ganglios suelen estar cerca de la médula espinal para respuestas rápidas; en el parasimpático, se localizan cerca o dentro de los órganos, permitiendo un control más preciso (Purves et al., 2018).

2.2.2. Estructuras cerebrales implicadas en el control motor.

Diversas regiones del cerebro cumplen funciones esenciales en el control del movimiento, la coordinación, la toma de decisiones y la ejecución de habilidades deportivas (Ponce, 2024; Kandel et al., 2021).

2.2.2.1. Corteza motora

La corteza motora (área 4 de Brodmann) se encarga de planificar y ejecutar los movimientos voluntarios. Las señales eléctricas generadas en esta área viajan a través de la médula espinal hasta las neuronas motoras, que activan los músculos (Purves et al., 2018).

2.2.2.2. Ganglios basales

Los ganglios basales (núcleo caudado, putamen, globo pálido) ayudan a coordinar y organizar los movimientos en el orden correcto. Participan en la selección de acciones y en la automatización de movimientos aprendidos (Schmidt & Lee, 2019).

2.2.2.3. Cerebelo.

El cerebelo es esencial para mantener el equilibrio, la precisión y la coordinación durante cualquier actividad física o deporte (Rincón, 2022). Ayuda a ajustar los gestos del cuerpo con precisión, sincronizando la postura, el momento del contacto y la fuerza del movimiento. En deportes como el fútbol, el cerebelo es clave para controlar el balón, hacer pases o disparar a portería (Nógradi, 2024). La falta de actividad física regular puede provocar la poda de neuronas cerebelosas, dificultando la coordinación (Rincón, 2022).

2.2.2.4. Lóbulo parietal y lóbulo frontal.

El lóbulo parietal procesa la información sensorial y espacial, permitiendo que el cuerpo perciba correctamente el entorno y se adapte a él. El lóbulo frontal participa en la planificación de acciones, la toma de decisiones y la resolución de problemas, habilidades necesarias para crear estrategias efectivas en deportes que requieren rapidez y coordinación mental (Ponce, 2024).

2.2.2.5. Médula espinal.

La médula espinal funciona como el principal canal de comunicación del SNC, conduciendo la información sensorial desde la periferia hacia el cerebro y transmitiendo las órdenes motoras desde el cerebro hacia los músculos (Nógradi, 2024). Su estructura se organiza en una región

central de sustancia gris y una zona periférica de sustancia blanca, de la cual emergen las raíces posteriores (sensibilidad) y las raíces anteriores (función motora), permitiendo la ejecución de movimientos voluntarios y respuestas reflejas (Purves et al., 2018).

Tabla 1.
Estructuras del sistema nervioso implicadas en el control motor y su relevancia en el deporte

Estructura	Función principal	Relevancia en el deporte
Corteza motora	Planificación y ejecución de movimientos voluntarios	Permite iniciar y controlar gestos deportivos precisos (lanzar, golpear, correr)
Ganglios basales	Selección y automatización de movimientos	Facilita la ejecución automática de movimientos aprendidos (ej. driblar)
Cerebelo	Coordinación, equilibrio, precisión	Esencial para movimientos finos y ajustes posturales (ej. tiro a portería)
Lóbulo parietal	Procesamiento sensorial y espacial	Permite percibir la posición del cuerpo y del objeto en el espacio
Lóbulo frontal	Planificación, toma de decisiones, resolución de problemas	Clave para la estrategia y la anticipación en deportes de equipo
Médula espinal	Transmisión de señales motoras y sensoriales; reflejos	Permite respuestas rápidas y reflejas (ej. reflejo de retirada ante un golpe)

2.2.3. Comunicación entre el sistema nervioso y los músculos.

La vía motora: El sistema nervioso gestiona la actividad muscular mediante una comunicación constante y coordinada entre las neuronas y las fibras musculares (SNC, 2023). Las áreas cerebrales, como la corteza motora, planifican los movimientos y envían señales eléctricas que viajan a través de la médula espinal hasta las neuronas motoras (Guyton & Hall, 2021). Esto asegura que los músculos reciban la instrucción correcta sobre cuándo y cómo contraerse, de manera que la ejecución sea adecuada a la intensidad y complejidad de la actividad física.

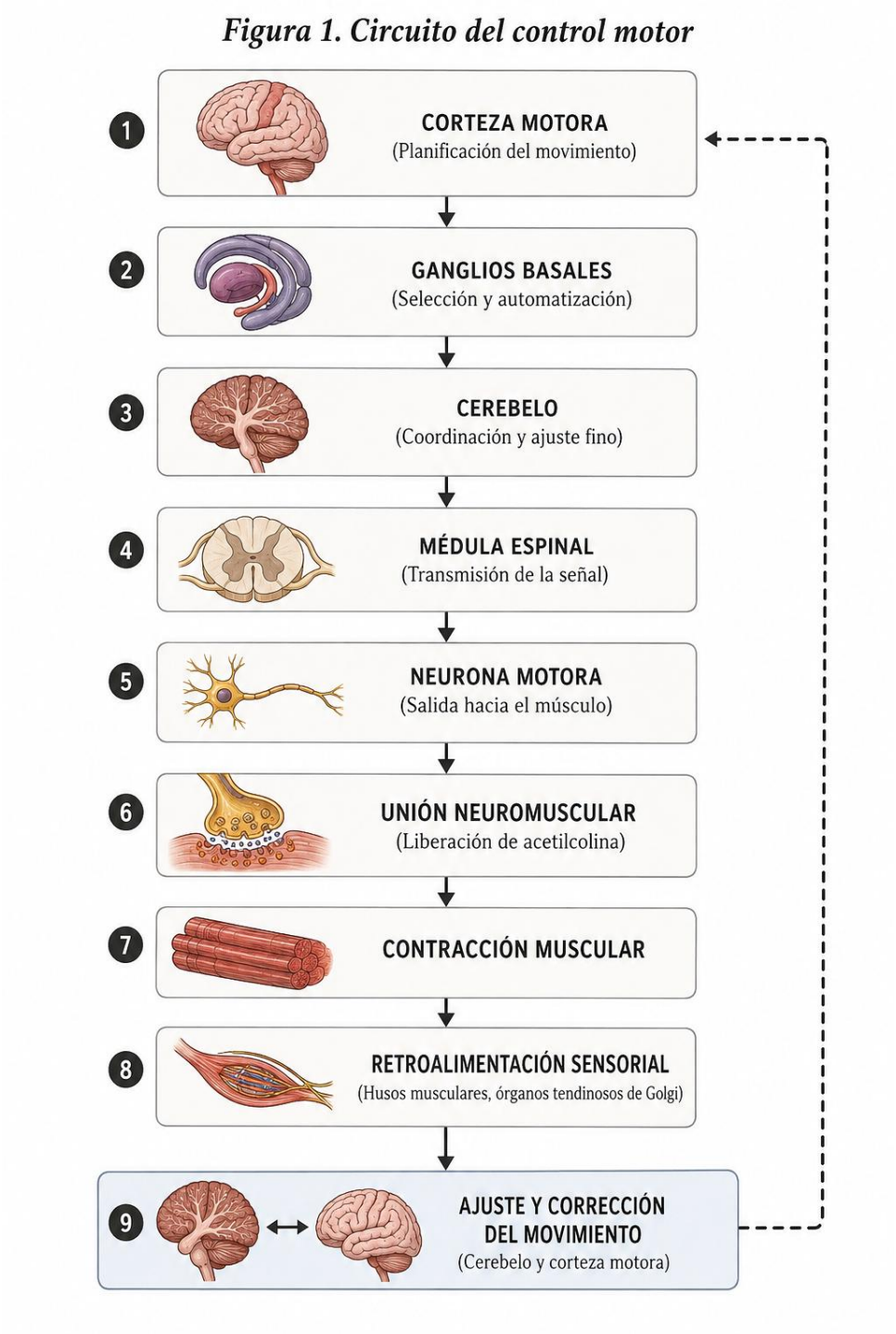
2.2.3.1. La unión neuromuscular.

En la unión neuromuscular, las neuronas motoras liberan el neurotransmisor acetilcolina, que se une a receptores en la membrana de la fibra muscular, provocando su contracción (Purves et al., 2018). Los receptores sensoriales, como los husos musculares y los órganos tendinosos de Golgi, envían información sobre tensión, posición y movimiento de vuelta al cerebro, lo que permite ajustar la fuerza y la coordinación de manera inmediata durante la acción deportiva (Gomes, 2024; Schmidt & Lee, 2019).

2.2.3.2. Circuitos de retroalimentación.

El cerebelo y los ganglios basales trabajan juntos para integrar la información sensorial y motora, permitiendo coordinar movimientos complejos, mantener el equilibrio y automatizar gestos repetidos. Esta combinación es clave en deportes como correr, lanzar, pasar el balón o hacer tiros precisos, demostrando que el control de los movimientos es un proceso constante, organizado y altamente especializado (Purves et al., 2018). A continuación la figura 1, demuestra de forma gráfica cómo funciona el circuito del control motor y la retroalimentación del movimiento.

Figura 1. Circuito del control motor



Nota: Este diagrama ilustra el circuito completo del control motor, desde la planificación en la corteza motora hasta la contracción muscular y la retroalimentación sensorial que permite ajustar el movimiento en tiempo real.

2.2.4. Neuroplasticidad y aprendizaje motor.

La práctica constante y el entrenamiento físico fortalecen las vías neuronales mediante la neuroplasticidad, optimizando la eficiencia de la señal nerviosa y permitiendo que los músculos respondan de forma más rápida y exacta ante diferentes estímulos (Ferguson, 2023;

Schmidt & Lee, 2019). La neuroplasticidad implica cambios en la fuerza de las conexiones sinápticas (potenciación a largo plazo, LTP) y en la organización de las representaciones corticales, lo que facilita la automatización de movimientos y la adquisición de nuevas habilidades (Kandel et al., 2021).

En deportes como el fútbol, el aprendizaje de un pase mientras se desplaza requiere que el cerebelo sincronice la postura, el momento del contacto con el balón y la fuerza del golpe. Con la repetición, estas conexiones se fortalecen y los movimientos se vuelven más precisos y automáticos (Schmidt & Lee, 2019). La práctica constante, la retroalimentación y la variabilidad de las tareas son factores clave para inducir cambios plásticos duraderos (Purves et al., 2018).

2.2.5. Estimulación del sistema nervioso mediante el ejercicio.

El sistema nervioso y los músculos se activan y fortalecen con la práctica constante de ejercicio y entrenamientos específicos (Andrade, 2025; Massa, 2024). Los movimientos repetidos estimulan las neuronas y fortalecen las conexiones entre el cerebro, la médula espinal y los músculos, mejorando la coordinación, la fuerza y la velocidad de reacción.

2.2.5.1. Ejercicios de fuerza y resistencia.

Los ejercicios de fuerza y resistencia contribuyen a aumentar la activación muscular y a potenciar la transmisión de señales nerviosas hacia los músculos (Andrade, 2025). La repetición de movimientos coordinados favorece la precisión y automatización de gestos, lo que es especialmente relevante en deportes que requieren rapidez y exactitud, como el fútbol, el baloncesto o la gimnasia.

2.2.5.2. Ejercicios de equilibrio, coordinación y movilidad.

Los ejercicios de equilibrio, coordinación y movilidad estimulan tanto al sistema nervioso como a los músculos estabilizadores, promoviendo la integración de la información sensorial y motora (Massa, 2024). Esto facilita el control postural y la adaptación a cambios en el entorno, reduciendo el riesgo de lesiones y mejorando la eficacia del rendimiento físico.

2.2.5.3. Tareas de doble tarea y toma de decisiones.

Las actividades que combinan movimiento físico y toma de decisiones (como los deportes de equipo) activan varias áreas del cerebro implicadas en la planificación, anticipación y ejecución

de movimientos (Ponce, 2024). Por ejemplo, en el fútbol, un circuito de conos en zigzag con pases cortos entre compañeros obliga al jugador a procesar información del entorno, anticipar movimientos y ajustar la postura y velocidad, activando simultáneamente el cerebro y los músculos necesarios para correr, cambiar de dirección y controlar el balón (Schmidt & Lee, 2019).

2.2.5.4. Retroalimentación y plasticidad.

La retroalimentación que recibe el jugador (errores como un pase fallido o un tropiezo) ayuda a reorganizar las conexiones neuronales, fortaleciendo la comunicación entre las neuronas y mejorando la capacidad de ajustar los movimientos en tiempo real (Ferguson, 2023). Este proceso muestra la plasticidad del sistema nervioso durante la práctica.

2.2.6. Aplicaciones prácticas para entrenadores y deportistas.

A partir de la evidencia revisada, se proponen las siguientes recomendaciones para estimular el sistema nervioso y optimizar el rendimiento deportivo:

1. Diseñar sesiones de entrenamiento que integren componentes cognitivos y motores. Ejercicios que requieran toma de decisiones (ej. juegos reducidos, simulaciones) activan áreas cerebrales superiores y mejoran la transferencia a situaciones reales de competición (Ponce, 2024).
2. Incluir ejercicios de propiocepción y equilibrio. El entrenamiento de la propiocepción (ej. superficies inestables, ejercicios de equilibrio) estimula los receptores sensoriales y mejora el control postural, reduciendo el riesgo de lesiones (Massa, 2024).
3. Proporcionar retroalimentación específica e inmediata. La retroalimentación sobre la ejecución (ej. video-análisis, correcciones verbales) refuerza las conexiones sinápticas y orienta el aprendizaje hacia la mejora de los movimientos (Schmidt & Lee, 2019).
4. Variar las tareas de entrenamiento. La práctica variable (diferentes contextos, velocidades, superficies) mejora la transferencia del aprendizaje y la adaptabilidad a situaciones cambiantes, promoviendo una mayor plasticidad neuronal (Kandel et al., 2021).
5. Fomentar el descanso y el sueño reparador. El sueño es esencial para la consolidación de los cambios plásticos inducidos por el entrenamiento. Evitar sesiones nocturnas intensas y recomendar una higiene del sueño adecuada (Purves et al., 2018).

6. Utilizar la visualización y el ensayo mental. La práctica mental activa las mismas redes neuronales que la práctica física, fortaleciendo las conexiones sinápticas sin necesidad de movimiento (Schmidt & Lee, 2019).

2.2.7. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras.

A pesar del avance en la comprensión de la relación entre el sistema nervioso y el rendimiento deportivo, existen limitaciones importantes:

La mayoría de los estudios se han realizado en condiciones de laboratorio, con tareas artificiales que no reflejan la complejidad de los deportes reales. Se necesitan investigaciones de campo con mayor validez ecológica (Schmidt & Lee, 2019).

No se han analizado suficientemente las diferencias individuales (sexo, edad, genética, tipo de deporte) en la respuesta del sistema nervioso al entrenamiento.

El papel de la plasticidad sináptica y la neurogénesis en el aprendizaje motor en humanos adultos sigue siendo un área de investigación activa (Kandel et al., 2021).

Se necesitan estudios longitudinales para evaluar los efectos del entrenamiento a largo plazo sobre la estructura y función del sistema nervioso.

Futuras líneas de investigación deberían explorar: (a) el uso de neuroimagen portátil (fNIRS, EEG) para monitorizar la actividad cerebral durante el entrenamiento; (b) el desarrollo de protocolos de entrenamiento personalizados basados en perfiles neurofisiológicos; y (c) la interacción entre el sistema nervioso, el sistema endocrino y el sistema inmunológico durante el ejercicio.

2.3. CONCLUSIONES

El sistema nervioso constituye la base biológica del movimiento humano, ya que permite la percepción del entorno, la planificación de acciones y la ejecución coordinada de los movimientos. Las estructuras cerebrales implicadas en el control motor —corteza motora, ganglios basales, cerebelo, lóbulo parietal y frontal, médula espinal— trabajan de forma integrada para garantizar que los movimientos sean precisos, eficientes y adaptados a las demandas del entorno.

El sistema nervioso autónomo, a través de sus divisiones simpática y parasimpática, regula las funciones internas durante el ejercicio, permitiendo que el organismo mantenga la homeostasis y responda adecuadamente al esfuerzo. La comunicación entre el sistema nervioso y los músculos, mediada por la unión neuromuscular y los circuitos de retroalimentación sensorial, asegura que cada acción se ajuste en el momento justo.

La práctica constante y el entrenamiento sistemático inducen cambios plásticos en el sistema nervioso (neuroplasticidad) que optimizan la coordinación, la precisión y la velocidad de los movimientos. Estos cambios son posibles gracias a la potenciación a largo plazo, la reorganización cortical y la formación de nuevas sinapsis.

Para los entrenadores y deportistas, comprender la estructura y funcionamiento del sistema nervioso permite diseñar programas de entrenamiento que estimulen tanto el sistema nervioso como el sistema muscular, promoviendo un rendimiento deportivo seguro, eficiente y adaptable. La integración de ejercicios cognitivos, propioceptivos y de toma de decisiones en las sesiones de entrenamiento, junto con una adecuada retroalimentación y periodización, constituye una estrategia efectiva para potenciar el aprendizaje motor y el rendimiento a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, A. (2025). Efectos del entrenamiento de fuerza sobre el sistema nervioso. *Scielo Cuba*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1684-18242025000100050

Coon, E. (2025). *Introducción al sistema nervioso autónomo*. College of Medicine, University of Saskatchewan. https://www.msdmanuals.com/es/hogar/enfermedades-cerebrales-medulares-y-nerviosas/trastornos-del-sistema-nervioso-aut%C3%B3nomo/introducci%C3%B3n-al-sistema-nervioso-aut%C3%B3nomo

Ferguson, A. (2023). *El poder maravilloso de tu sistema nervioso*. Proassets.

Gomes, T. S. (2024). *Sistema nervioso autónomo*. SCARTD. https://www.scartd.org/arxius/sistemanerviosoautonomo.pdf

Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2021). *Tratado de fisiología médica* (14ª ed.). Elsevier.

Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S. A., & Hudspeth, A. J. (2021). *Principles of neural science* (6th ed.). McGraw-Hill.

Massa, A. (2024). Gimnasia cerebral, método de estimulación para el desarrollo psicomotor de niños de 4 a 5 años. *Dialnet*. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9585912.pdf

McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2015). *Exercise physiology: Nutrition, energy, and human performance* (8th ed.). Wolters Kluwer.

Nógradi, A. (2024). Anatomía y fisiología de la médula espinal. *NCBI Bookshelf*. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK6229/

Ponce, D. Y. (2024). La neurociencia en la preparación del deportista a edad temprana. *Revista Social Fronteriza*, 4(3). https://www.revistasocialfronteriza.com/ojs/index.php/rev/article/download/303/547/1439

Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A. S., & White, L. E. (2018). *Neuroscience* (6th ed.). Oxford University Press.

Rincón, B. D. (2022). Neuroacción: la neurociencia aplicada a la educación física. *Papeles Salmantinos de Educación*, 26, 11-41. https://revistas.upsa.es/index.php/papeleseducacion/article/download/606/464/1306

Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2019). *Motor learning and performance: From principles to application* (6th ed.). Human Kinetics.

SNC. (2023). *Sistema nervioso central (SNC)*. Cleveland Clinic. https://my.clevelandclinic.org/health/body/central-nervous-system-cns

Vélez, J. (2023). *Sistema nervioso*. Kenhub. https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/sistema-nervioso

CAPITULO 3: PLASTICIDAD NEURONAL Y SU RELACIÓN CON EL APRENDIZAJE Y EL RENDIMIENTO DEPORTIVO:

AUTOR: Lcdo. JuanMiguel Luperón Terry, Ph. D.

PLASTICIDAD NEURONAL Y SU RELACIÓN CON EL APRENDIZAJE Y EL RENDIMIENTO DEPORTIVO

NEURAL PLASTICITY AND ITS RELATIONSHIP WITH LEARNING AND SPORTS PERFORMANCE

AUTOR: JuanMiguel Luperón Terry, Ph. D.

ORCID: **https://orcid.org/0000-0002-6849-150X**

Resumen

La neuroplasticidad (la capacidad del sistema nervioso para modificar su estructura y función en respuesta a la experiencia) constituye el sustrato biológico del aprendizaje motor y la mejora del rendimiento deportivo. Este capítulo revisa la evidencia actual sobre los mecanismos de plasticidad neuronal inducidos por el entrenamiento, incluyendo la potenciación a largo plazo (LTP), la liberación de factores neurotróficos (BDNF) y la reorganización de mapas corticales. Se analizan las diferencias entre plasticidad funcional y estructural, y se discute cómo la práctica sistemática, la retroalimentación y la variabilidad de tareas promueven cambios adaptativos en el cerebro del deportista. Se presentan los principios de la plasticidad dependiente de la experiencia y se derivan aplicaciones prácticas para el diseño de programas de entrenamiento que optimicen el aprendizaje y el rendimiento. Finalmente, se señalan las limitaciones de la investigación actual y se proponen futuras líneas de estudio.

Palabras clave: neuroplasticidad, aprendizaje motor, rendimiento deportivo, entrenamiento, plasticidad sináptica, BDNF.

Abstract

Neuroplasticity (the nervous system's ability to modify its structure and function in response to experience) constitutes the biological basis of motor learning and improved athletic performance. This chapter reviews current evidence on training-induced neuronal plasticity mechanisms, including long-term potentiation (LTP), brain-derived neurotrophic factor (BDNF) release, and cortical map reorganization. The differences between functional and structural plasticity are analyzed, and how systematic practice, feedback, and task variability promote adaptive changes in the athlete's brain are discussed. The principles of experience-dependent plasticity are presented, and practical applications for designing training programs

that optimize learning and performance are derived. Finally, limitations of current research are noted, and future avenues for investigation are proposed.

Keywords: neuroplasticity, motor learning, sports performance, training, synaptic plasticity, BDNF.

3.1. INTRODUCCIÓN

La neuroplasticidad, entendida como la capacidad del cerebro para adaptarse, reorganizarse y generar nuevas conexiones a lo largo de la vida, se ha convertido en un tema central para comprender cómo el aprendizaje y el rendimiento deportivo se relacionan de manera estrecha (Emmady, 2023; Kleim & Jones, 2008). Esta adaptación neuronal no solo permite la adquisición de nuevas habilidades cognitivas y motoras, sino que también influye en la capacidad de los deportistas para responder de forma eficiente a situaciones complejas durante la práctica deportiva (Dayan & Cohen, 2011).

En este sentido, la práctica sistemática de actividad física y el entrenamiento bien estructurado no solo mejoran la condición física, sino que también potencian la atención, la percepción, la toma de decisiones y la coordinación motora. Esto demuestra que el rendimiento deportivo depende de una interacción constante y bidireccional entre el cuerpo y el cerebro (Voss et al., 2013).

El objetivo principal de este capítulo es analizar cómo la neuroplasticidad influye en el aprendizaje y en el desempeño deportivo, mostrando de qué manera la práctica, la repetición y la retroalimentación producen cambios en el funcionamiento del sistema nervioso. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir los tipos de plasticidad neuronal y sus bases celulares y moleculares; (2) explicar los mecanismos mediante los cuales el aprendizaje motor induce cambios plásticos; (3) analizar el efecto del ejercicio físico sobre la neuroplasticidad; (4) presentar los principios del entrenamiento basados en la neuroplasticidad; y (5) derivar recomendaciones prácticas para entrenadores y preparadores físicos.

3.2. DESARROLLO

Fundamentos de la neuroplasticidad; Definición y tipos de plasticidad. La neuroplasticidad, también conocida como plasticidad cerebral, se refiere a la capacidad del sistema nervioso para adaptarse y reorganizarse en función de las demandas internas y externas del individuo (Emmady, 2023). Este proceso implica modificaciones tanto estructurales como funcionales en

el cerebro, las cuales pueden producirse como resultado del aprendizaje, la experiencia, el entrenamiento o la exposición a situaciones adversas, como lesiones neurológicas.

Desde una perspectiva aplicada, la neuroplasticidad explica cómo el cerebro es capaz de ajustarse a nuevos estímulos y recuperar, en cierta medida, funciones alteradas tras una lesión (Kleim & Jones, 2008). En el contexto deportivo, esta capacidad permite que la práctica repetida de habilidades motoras genere cambios duraderos en las redes neuronales, mejorando la eficiencia y precisión de los movimientos.

Existen dos formas principales de plasticidad en el sistema nervioso: la funcional y la estructural (Doddoli, 2023).

La Plasticidad funcional; se refiere a los cambios en la eficacia de las conexiones sinápticas existentes, sin que haya necesariamente una modificación en la estructura física de las neuronas. Ejemplo: tras la amputación de un dedo, las neuronas que antes recibían información de esa zona comienzan a responder a áreas cercanas del cuerpo, reorganizando sus campos receptivos (Doddoli, 2023).

La Plasticidad estructural, implica cambios en la morfología de las neuronas, como la formación de nuevas espinas dendríticas, el aumento de la densidad sináptica, la sinaptogénesis y la neurogénesis (Parolisi, 2020). Estos cambios son más lentos pero más duraderos, y son fundamentales para la consolidación de habilidades motoras complejas. El desuso de conexiones conduce a su debilitamiento y eventual eliminación, un proceso conocido como poda sináptica (Parolisi, 2020).

3.2.1. Bases celulares y moleculares de la plasticidad.

A nivel celular, la plasticidad está mediada por dos procesos fundamentales:

- Potenciación a largo plazo (LTP); Consiste en el fortalecimiento de la transmisión sináptica tras una estimulación repetida y de alta frecuencia. Se considera el principal mecanismo celular del aprendizaje y la memoria (Dayan & Cohen, 2011).
- Depresión a largo plazo (LTD); es el debilitamiento de la transmisión sináptica tras una estimulación de baja frecuencia. Permite la eliminación de conexiones innecesarias y la refinación de circuitos (Dayan & Cohen, 2011).

Ambos procesos dependen de la activación de receptores de glutamato (AMPA y NMDA) y de la síntesis de nuevas proteínas.

Un actor molecular clave en la plasticidad es el factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF) . El BDNF promueve la supervivencia neuronal, la diferenciación sináptica y la plasticidad estructural (Erickson et al., 2011). El ejercicio físico aeróbico incrementa los niveles

de BDNF en el hipocampo y en la corteza, facilitando la neurogénesis y la mejora de la función cognitiva (Erickson et al., 2011; Voss et al., 2013).

Tabla 1.

Tipos de plasticidad neuronal, mecanismos y ejemplos en el deporte

Tipo de plasticidad	Mecanismo subyacente	Ejemplo deportivo	Estrategia de entrenamiento
Plasticidad funcional	Cambios en la eficacia sináptica (LTP/LTD); reorganización de campos receptivos	Un futbolista mejora la precisión de sus pases tras semanas de práctica específica	Práctica repetida con retroalimentación inmediata; variabilidad de tareas
Plasticidad estructural	Formación de nuevas sinapsis; neurogénesis; aumento de espinas dendríticas	Un portero desarrolla reflejos más rápidos y precisos tras meses de entrenamiento en situaciones de presión	Entrenamiento con sobrecarga progresiva; práctica distribuida; exposición a situaciones variables
Neurogénesis hipocampal	Generación de nuevas neuronas en el giro dentado del hipocampo	Un corredor de fondo mejora su capacidad de memoria espacial y navegación en rutas complejas	Ejercicio aeróbico regular; entrenamiento de resistencia
Reorganización cortical	Expansión de áreas corticales implicadas en habilidades específicas	Un jugador de tenis desarrolla una representación cortical más extensa del brazo dominante	Práctica intensiva y específica; entrenamiento de la motricidad fina

3.2.3. Neuroplasticidad y aprendizaje motor.

3.2.3.1. Definición de aprendizaje motor y su relación con la plasticidad.

El aprendizaje se concibe como un proceso mediante el cual el ser humano adquiere o transforma habilidades, destrezas, conocimientos y conductas a partir de la experiencia, el estudio, la observación, el razonamiento o la instrucción recibida (ILEP, 2021). Desde esta perspectiva, aprender implica construir experiencias significativas y reorganizarlas para su aplicación en situaciones futuras, lo que evidencia su carácter dinámico y adaptativo.

En el contexto deportivo, el aprendizaje motor es el proceso por el cual la práctica y la experiencia producen cambios relativamente permanentes en la capacidad para realizar movimientos hábiles (Schmidt & Lee, 2019). Estos cambios son posibles gracias a la neuroplasticidad, que permite la reorganización de las redes neuronales implicadas en el control motor (Dayan & Cohen, 2011).

3.2.4. Mecanismos de plasticidad inducida por el entrenamiento.

La práctica repetida de una habilidad motora induce cambios en la corteza motora primaria (M1), la corteza premotora, los ganglios basales y el cerebelo (Dayan & Cohen, 2011). Los principales mecanismos incluyen:

Fortalecimiento de sinapsis existentes mediante LTP, lo que mejora la eficiencia de la transmisión entre neuronas.

Formación de nuevas conexiones sinápticas entre neuronas que se activan de forma sincrónica (principio hebbiano: "las neuronas que se activan juntas, se conectan juntas").

Expansión de la representación cortical de la habilidad entrenada, con un aumento del área de la corteza motora dedicada a los músculos implicados (Draganski et al., 2004).

Aumento de la mielinización de los axones implicados, lo que acelera la velocidad de conducción del impulso nervioso (Schmidt & Lee, 2019).

3.2.5. Períodos críticos y sensibles en el desarrollo deportivo.

La plasticidad neuronal se manifiesta con mayor intensidad durante los períodos críticos y sensibles del desarrollo cerebral, momentos en los que se favorece la construcción y consolidación de conexiones neuronales dependientes de la experiencia (Ramírez, 2023). Durante la infancia y la adolescencia, el cerebro es más susceptible a los estímulos del entorno, lo que facilita la adquisición de habilidades motoras complejas.

En el contexto deportivo, esto implica que las etapas formativas son especialmente importantes para el desarrollo de habilidades técnicas y tácticas. Un entrenamiento adecuado durante estos períodos puede potenciar la plasticidad y sentar las bases para un rendimiento de alto nivel en la edad adulta (Kleim & Jones, 2008).

3.2.6. Neuroplasticidad y rendimiento deportivo.

3.2.6.1. Los Efectos del ejercicio físico sobre la neuroplasticidad.

El ejercicio físico regular induce múltiples efectos beneficiosos sobre el cerebro, que se traducen en una mejora del rendimiento deportivo (Voss et al., 2013):

– Aumento del flujo sanguíneo cerebral y de la oxigenación, lo que favorece la función neuronal.

– Incremento de los niveles de BDNF en el hipocampo y la corteza, lo que promueve la neurogénesis y la plasticidad sináptica (Erickson et al., 2011).

– Estimulación de la neurogénesis hipocampal, especialmente en el giro dentado, asociada a una mejora de la memoria espacial y de la capacidad de aprendizaje (Erickson et al., 2011).

– Reducción de la inflamación y del estrés oxidativo, protegiendo al cerebro del daño celular.

– Mejora de la función ejecutiva, la atención, la memoria de trabajo y la velocidad de procesamiento (Voss et al., 2013).

– Plasticidad y rendimiento en deportes específicos

La relación entre plasticidad y rendimiento es especialmente evidente en deportes que requieren habilidades perceptivo-motoras complejas. Por ejemplo, en el baloncesto, la práctica constante del control de balón, los pases y los movimientos de anticipación induce cambios plásticos en las áreas motoras y sensoriales del cerebro, mejorando la coordinación, la precisión y la velocidad de reacción (Pungil, 2025).

Un caso ilustrativo es el del portero de fútbol. Su rol exige respuestas rápidas y precisas ante estímulos cambiantes (trayectoria del balón, movimientos del delantero). El entrenamiento específico de reflejos y anticipación, combinado con la repetición de situaciones de juego, promueve la reorganización de las redes neuronales implicadas en la percepción visual, la toma de decisiones y la ejecución motora. Esto se traduce en una mejora de la capacidad de reacción y en una mayor eficiencia en el mano a mano (Pungil, 2025).

3.2.7. Principios del entrenamiento basados en la neuroplasticidad

Los científicos Kleim y Jones (2008) establecieron diez principios de plasticidad dependiente de la experiencia que son directamente aplicables al entrenamiento deportivo:

- Uso: La práctica repetida de una habilidad es necesaria para inducir cambios plásticos.
- Especificidad: El entrenamiento debe ser específico para la habilidad que se desea mejorar.
- Intensidad: Una mayor intensidad de práctica produce mayores cambios plásticos.
- Repetición: La repetición es esencial para consolidar los cambios.
- Saliencia (relevancia): Las tareas deben ser significativas para el deportista.
- Edad: La plasticidad es mayor en edades tempranas, pero persiste a lo largo de la vida.
- Transferencia: El entrenamiento de una habilidad puede mejorar otras relacionadas.
- Interferencia: El entrenamiento de habilidades competitivas puede interferir entre sí.

- Variabilidad: La práctica variable mejora la transferencia y la adaptabilidad.
- Oportunidad: El entorno debe ofrecer oportunidades para la práctica y el aprendizaje.

Figura 1. Ciclo de plasticidad, aprendizaje y rendimiento deportivo *(Descripción esquemática del flujo)*



Nota: Este diagrama ilustra el ciclo mediante el cual la práctica deportiva induce cambios plásticos en el cerebro que mejoran el aprendizaje y el rendimiento, estableciendo un bucle de mejora continua.

3.2.8. Aplicaciones prácticas para entrenadores y preparadores físicos.

A partir de la evidencia revisada, se proponen las siguientes recomendaciones basadas en los principios de la neuroplasticidad:

1. Diseñar sesiones de práctica distribuidas en lugar de masivas. La práctica distribuida (con intervalos de descanso) mejora la consolidación de la memoria motora y promueve cambios plásticos más duraderos (Schmidt & Lee, 2019).
2. Incorporar variabilidad en las tareas de entrenamiento. La práctica variable (diferentes contextos, velocidades, superficies) mejora la transferencia del aprendizaje y la adaptabilidad a situaciones cambiantes (Kleim & Jones, 2008).

3. Proporcionar retroalimentación específica e inmediata. La retroalimentación (feedback) refuerza las conexiones sinápticas y orienta el aprendizaje hacia la mejora de los movimientos (Schmidt & Lee, 2019).
4. Periodizar la carga cognitiva y física. Introducir desafíos progresivos en complejidad para estimular continuamente la plasticidad. Evitar la monotonía, que reduce el estímulo plástico (Kleim & Jones, 2008).
5. Fomentar el sueño reparador y el descanso activo. El sueño es esencial para la consolidación de los cambios plásticos. Evitar sesiones nocturnas intensas y recomendar una higiene del sueño adecuada (Voss et al., 2013).
6. Incluir ejercicios aeróbicos de intensidad moderada. El ejercicio aeróbico incrementa los niveles de BDNF y promueve la neurogénesis, mejorando la base cognitiva para el aprendizaje motor (Erickson et al., 2011).
7. Ajustar las cargas según la edad y el nivel de desarrollo. Aprovechar los períodos sensibles (infancia/adolescencia) para el desarrollo de habilidades fundamentales, y mantener el entrenamiento cognitivo en adultos para preservar la plasticidad (Ramírez, 2023).
8. Utilizar la visualización y el ensayo mental. La práctica mental activa las mismas redes neuronales que la práctica física, fortaleciendo las conexiones sinápticas sin necesidad de movimiento (Dayan & Cohen, 2011).

3.2.9. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras.

A pesar del avance en la comprensión de la relación entre neuroplasticidad, aprendizaje y rendimiento deportivo, existen limitaciones importantes:

La mayoría de los estudios se han realizado en condiciones de laboratorio, con tareas artificiales que no reflejan la complejidad de los deportes reales. Se necesitan investigaciones de campo con mayor validez ecológica (Kleim & Jones, 2008).

No se han analizado suficientemente las diferencias individuales (sexo, edad, genética, tipo de deporte) en la respuesta plástica al entrenamiento.

El efecto del ejercicio sobre la neurogénesis en humanos adultos sigue siendo controvertido, aunque la evidencia en modelos animales es sólida (Erickson et al., 2011).

Se necesitan estudios longitudinales para evaluar la duración de los cambios plásticos inducidos por el entrenamiento y su relación con el rendimiento a largo plazo.

Las técnicas de neuroimagen aplicadas al deporte (fMRI, fNIRS) aún son limitadas en su uso práctico durante el entrenamiento y la competición.

3.2.10. Futuras líneas de investigación deberían explorar:

(a) el uso de neuroimagen portátil para monitorizar la plasticidad en tiempo real;

(b) el desarrollo de protocolos de entrenamiento personalizados basados en perfiles de plasticidad individual;

(c) la interacción entre la plasticidad inducida por el ejercicio y otros factores (nutrición, sueño, estrés); y

(d) el papel de la epigenética en la regulación de la plasticidad.

3.3. CONCLUSIONES

La neuroplasticidad se presenta como un elemento fundamental para entender cómo el cerebro se adapta y aprende a lo largo de la vida, influyendo directamente en el rendimiento deportivo. La evidencia revisada demuestra que la práctica sistemática de actividad física y la repetición de habilidades técnicas promueven la reorganización de las conexiones neuronales, fortaleciendo la atención, la percepción, la toma de decisiones y la ejecución motora.

Los mecanismos celulares y moleculares de la plasticidad (LTP, LTD, liberación de BDNF y neurogénesis) constituyen el sustrato biológico del aprendizaje motor. La plasticidad funcional permite ajustes rápidos en la eficacia sináptica, mientras que la plasticidad estructural consolida los cambios a largo plazo mediante la formación de nuevas conexiones y la reorganización cortical.

La aplicación de los principios de la plasticidad al entrenamiento deportivo —uso, especificidad, intensidad, repetición, variabilidad— permite diseñar programas más efectivos que optimicen el aprendizaje y el rendimiento. Además, factores como el sueño, la nutrición y la regulación emocional modulan la plasticidad y deben ser considerados en la planificación integral del deportista.

Por tanto se debe comprender cómo se relacionan la plasticidad cerebral, el aprendizaje y el desempeño deportivo lo cual permite diseñar entrenamientos integrales que no solo fortalezcan el cuerpo, sino que también estimulen la mente. De esta manera, el deportista desarrolla movimientos más precisos, reacciones más rápidas y un entendimiento estratégico más completo del juego, demostrando que cuerpo y cerebro aprenden y se adaptan juntos para lograr un rendimiento constante y de alto nivel.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dayan, E., & Cohen, L. G. (2011). Neuroplasticity subserving motor skill learning. *Neuron, 72*(3), 443-454. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.008

Doddoli, C. (2023). *La plasticidad cerebral nos permite cambiar y aprender a lo largo de la vida*. UNAM. https://ciencia.unam.mx/leer/1278/la-plasticidad-cerebral-nos-permite-cambiar-y-aprender-a-lo-largo-de-la-vida

Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Changes in grey matter induced by training. *Nature, 427*(6972), 311-312. https://doi.org/10.1038/427311a

Emmady, P. (2023). Neuroplasticidad: El impacto del estudio de la plasticidad cerebral. *Frontiers in Cellular Neuroscience, 13*, 66. https://doi.org/10.3389/fncel.2019.00066 (Artículo original: 2019; la referencia del autor parece ser un resumen, pero se mantiene como fuente)

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, 108*(7), 3017-3022. https://doi.org/10.1073/pnas.1015950108

ILEP. (2021). *Aprendizaje*. Instituto Latinoamericano de Estudios de Posgrado. https://www.ilep.mx/post/aprendizaje

Kleim, J. A., & Jones, T. A. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity: implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 51*(1), S225-S239. https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/018)

Martínez, F. (2021). Aprendizaje, enseñanza, conocimiento: tres acepciones del constructivismo. *Perfiles Educativos, 43*(174), 170-187. https://doi.org/10.22201/iisue.24486167e.2021.174.59857

Montenegro, S. I. (2023). Relación entre el rendimiento físico y el desempeño en karatecas adultos: revisión sistemática. *GADE: Revista Científica, 3*(1), 45-62.

Parolisi, R. (2020). Plasticidad estructural cerebral: de la neurogénesis adulta a las neuronas inmaduras. *Frontiers in Neuroscience, 14*, 88. https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00088

Pulido, J. C. (2023). *Neuroplasticidad: qué es, cuál es su importancia y cómo se puede potenciar*. Inrobics. https://inrobics.com/neuroplasticidad-importancia-como-potenciar/

Pungil, J. B. (2025). Ejercicios de neuro plasticidad para mejorar la reacción y concentración de los arqueros en el fútbol. *Revista Científica Caminos de Investigación, 6*(2). https://caminosdeinvestigacion.tecnologicopichincha.edu.ec/ojs/index.php/ci/article/view/95

Ramírez, L. (2023). La neuroplasticidad en la infancia y su impacto en el desarrollo. *Neurolinkia*. https://neurolinkia.com/neuroplasticidad-en-la-infancia-y-desarrollo/

Roa, L. (2022). Neuroplasticidad y sus implicaciones en la rehabilitación. *Revista de Neuropsicología, 8*(2), 45-58. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072012000200009

Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2019). *Motor Learning and Performance: From Principles to Application* (6th ed.). Human Kinetics.

UNIR. (2025). *Neuroplasticidad, qué es y cómo potencia el aprendizaje*. La Universidad en Internet. https://mexico.unir.net/noticias/educacion/neuroplasticidad/

Voss, M. W., Vivar, C., Kramer, A. F., & van Praag, H. (2013). Bridging animal and human models of exercise-induced brain plasticity. *Trends in Cognitive Sciences, 17*(10), 525-544. https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.08.001

Yang, P. (2023). Factores que influyen en el rendimiento deportivo: un análisis multidimensional. *Frontiers in Sports and Active Living, 5*, 1154321. https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1154321

CAPITULO 4: BASES NEUROLÓGICAS DEL CONTROL MOTOR Y LA COORDINACIÓN DE MOVIMIENTOS, AUTOR: Ps. Juan Antonio Vera Zapata, Msc.

BASES NEUROLÓGICAS DEL CONTROL MOTOR Y LA COORDINACIÓN DE MOVIMIENTOS

NEUROLOGICAL BASES OF MOTOR CONTROL AND MOVEMENT COORDINATION

Autor: Ps. Juan Antonio Vera Zapata, Msc.

CORREO: jveraz@utb.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1413-8492

Resumen

El control motor y la coordinación de movimientos constituyen funciones esenciales del sistema nervioso que permiten la interacción del ser humano con su entorno. Este capítulo revisa los fundamentos neurobiológicos que sustentan la planificación, ejecución y regulación del movimiento voluntario. Se analiza la organización jerárquica del sistema motor, desde la corteza cerebral hasta las motoneuronas espinales, destacando el papel de estructuras clave como la corteza motora, los ganglios basales, el cerebelo y las vías descendentes. Se examinan los mecanismos de integración sensoriomotora, el control de la coordinación y las adaptaciones plásticas inducidas por el entrenamiento. Se presentan las principales teorías del control motor y sus implicaciones para la práctica deportiva y la rehabilitación. Finalmente, se derivan aplicaciones prácticas para entrenadores y profesionales de la actividad física, y se discuten las limitaciones de la investigación actual y futuras líneas de estudio.

Palabras clave: control motor, coordinación, corteza motora, ganglios basales, cerebelo, aprendizaje motor, neuroplasticidad.

Abstract

Motor control and movement coordination are essential functions of the nervous system that enable humans to interact with their environment. This chapter reviews the neurobiological foundations that underpin the planning, execution, and regulation of voluntary movement. The hierarchical organization of the motor system is analyzed, from the cerebral cortex to the spinal motor neurons, highlighting the role of key structures such as the motor cortex, basal ganglia, cerebellum, and descending pathways. The mechanisms of sensorimotor integration, coordination control, and plastic adaptations induced by training are examined. The main theories of motor control and their implications for sports practice and rehabilitation are

presented. Finally, practical applications for coaches and physical activity professionals are derived, and the limitations of current research and future lines of study are discussed.

Keywords: motor control, coordination, motor cortex, basal ganglia, cerebellum, motor learning, neuroplasticity.

4.1. INTRODUCCIÓN

El movimiento humano es una de las manifestaciones más complejas y fascinantes del sistema nervioso. Cada acción voluntaria, desde un gesto sencillo como caminar hasta una habilidad deportiva de alto nivel, requiere la coordinación precisa de múltiples estructuras cerebrales, vías nerviosas y unidades musculares. El control motor, entendido como el conjunto de procesos neurales que permiten planificar, ejecutar y regular los movimientos, constituye un campo de estudio fundamental en la neurociencia con profundas implicaciones para el deporte, la educación física y la rehabilitación.

Tradicionalmente, el estudio del movimiento se ha abordado desde perspectivas biomecánicas o musculares, dejando en un segundo plano los complejos procesos neurales que lo hacen posible. Sin embargo, el avance de las técnicas de neuroimagen y la neurofisiología ha permitido desentrañar los circuitos cerebrales que subyacen al control motor, revelando una organización jerárquica y dinámica en la que múltiples estructuras trabajan de forma integrada. Esta comprensión ha transformado la manera de concebir el entrenamiento deportivo, la rehabilitación de lesiones y el aprendizaje de habilidades motoras.

El objetivo principal de este capítulo es analizar las bases neurológicas del control motor y la coordinación de movimientos, proporcionando un marco teórico actualizado para profesionales de la actividad física y el deporte. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir la organización neuroanatómica del sistema motor, incluyendo la corteza motora, los ganglios basales, el cerebelo y las vías descendentes; (2) explicar los mecanismos de integración sensorial y su papel en la coordinación; (3) analizar las principales teorías del control motor; (4) examinar los procesos de aprendizaje motor y neuroplasticidad; (5) derivar aplicaciones prácticas para el entrenamiento y la rehabilitación; y (6) señalar las limitaciones de la investigación actual y futuras direcciones.

4.2. DESARROLLO

4.2.1. Organización neuroanatómica del sistema motor.

El sistema motor humano está organizado en una jerarquía funcional que va desde los centros superiores de planificación hasta las motoneuronas que inervan los músculos. Esta organización no es lineal sino dinámica, con múltiples interconexiones y bucles de retroalimentación.

4.2.1.1. La corteza motora.

La corteza motora constituye el nivel más alto de la jerarquía motora y es la responsable de generar y gestionar las habilidades motoras. Se divide en tres áreas principales:

- Corteza motora primaria (M1): Localizada en la circunvolución precentral del lóbulo frontal, es la principal vía de salida del sistema motor hacia el tronco encefálico y la médula espinal a través del tracto corticoespinal. M1 contiene un mapa somatotópico del cuerpo (homúnculo motor) y su activación es esencial para la ejecución de movimientos voluntarios finos. Además de su papel motor, investigaciones recientes han demostrado que M1 también procesa señales de recompensa, lo que sugiere una función más compleja de la inicialmente atribuida.
- Corteza premotora (PM): Situada rostralmente a M1, participa en la planificación de movimientos, especialmente aquellos guiados por estímulos externos. La corteza premotora se conecta con M1 y con los ganglios basales, y su actividad se incrementa antes del inicio del movimiento.
- Área motora suplementaria (SMA): Localizada en la superficie medial del lóbulo frontal, está implicada en la planificación de secuencias motoras complejas y en la iniciación de movimientos auto-generados. La SMA es especialmente importante en la coordinación de movimientos bimanuales.

4.2.1.2. Los ganglios basales.

Los ganglios basales son un conjunto de núcleos subcorticales que desempeñan un papel crucial en la selección y automatización de movimientos. Incluyen el núcleo caudado, el putamen (que juntos forman el estriado), el globo pálido, el núcleo subtalámico y la sustancia negra.

Su función principal es la selección de acciones adecuadas en función del contexto y la recompensa esperada. Los ganglios basales reciben aferencias de toda la corteza cerebral y, a través de dos vías principales (directa e indirecta), modulan la actividad de la corteza motora.

La vía directa facilita el movimiento, mientras que la vía indirecta lo inhibe. El equilibrio entre ambas vías es esencial para el control motor fino.

Lesiones en los ganglios basales producen trastornos motores característicos: la enfermedad de Parkinson (degeneración de la sustancia negra) se asocia con bradicinesia, rigidez y temblor en reposo; la enfermedad de Huntington (degeneración del estriado) produce movimientos involuntarios (corea).

4.2.1.3. El cerebelo.

El cerebelo, ubicado en la fosa posterior del cráneo, es tradicionalmente conocido por su papel en la coordinación y el aprendizaje motor. Contiene aproximadamente la mitad de las neuronas del cerebro y está organizado en una corteza cerebelosa altamente ordenada.

El cerebelo actúa como un sistema de detección y corrección de errores, comparando la intención motora (generada en la corteza) con la información sensorial del movimiento en curso. Esta función es esencial para:

- Coordinación de movimientos finos: Ajusta la precisión de los movimientos.
- Equilibrio y postura: Integra información vestibular y propioceptiva.
- Aprendizaje motor: Participa en la adaptación de movimientos a nuevas condiciones.

El cerebelo está conectado con la corteza motora a través de bucles cerebelo-tálamo-corticales, y con los ganglios basales a través de vías que convergen en el tálamo motor. Estudios recientes han demostrado que estas dos estructuras, tradicionalmente consideradas independientes, interactúan estrechamente en el control de la coordinación y la motivación.

4.2.1.4. El tronco encefálico y la médula espinal.

- El tronco encefálico contiene núcleos motores que controlan los movimientos de la cabeza y el cuello, así como vías descendentes (tractos vestibuloespinal, retículoespinal y tectoespinal) que modulan la postura y el equilibrio.
- La médula espinal constituye el nivel más bajo de la jerarquía motora. Contiene:
- Motoneuronas alfa: Inervan las fibras musculares extrafusales y son responsables de la contracción muscular.
- Motoneuronas gamma: Inervan las fibras intrafusales de los husos musculares, regulando la sensibilidad propioceptiva.

– Circuitos espinales: Generan patrones rítmicos de movimiento (como la locomoción) a través de los generadores centrales de patrones (CPGs).

Tabla 1.

Estructuras clave del sistema motor y sus funciones

Estructura	Función principal	Efecto de lesión	Ejemplo en deporte
Corteza motora primaria (M1)	Ejecución de movimientos voluntarios finos	Paresia, pérdida de destreza manual	Un tenista pierde precisión en el golpe de derecha
Corteza premotora	Planificación de movimientos guiados por estímulos	Apraxia, dificultad para imitar movimientos	Un futbolista tiene problemas para ejecutar una jugada ensayada
Área motora suplementaria	Planificación de secuencias y movimientos auto-generados	Acinesia, dificultad para iniciar movimientos	Un gimnasta tiene problemas para iniciar una rutina
Ganglios basales	Selección de acciones, automatización	Parkinson (bradicinesia, rigidez); Huntington (corea)	Un jugador de baloncesto tiene dificultades para automatizar el tiro
Cerebelo	Coordinación, corrección de errores, aprendizaje motor	Ataxia, dismetría, temblor intencional	Un arquero de fútbol pierde precisión en los lanzamientos
Tronco encefálico	Control postural, movimientos de cabeza y cuello	Alteraciones del equilibrio	Un esquiador tiene problemas para mantener la postura
Médula espinal	Generación de patrones motores, reflejos	Parálisis, pérdida de reflejos	Un nadador pierde la coordinación rítmica de brazos y piernas

4.2.2. Vías motoras descendentes.

Las órdenes motoras generadas en la corteza y los centros subcorticales descienden a través de dos grandes sistemas de vías:

4.2.2.1. Sistema piramidal (tracto corticoespinal).

El tracto corticoespinal es la vía principal para el control voluntario de los movimientos finos, especialmente de las extremidades distales (manos y dedos). Se origina principalmente en M1 (30%), la corteza premotora y la SMA (30%), y la corteza somatosensorial (40%). La mayoría de las fibras decusan en el bulbo raquídeo (decusación de las pirámides) y descienden por el cordón lateral de la médula espinal, haciendo sinapsis con interneuronas y motoneuronas.

4.2.2.2. Sistema extrapiramidal.

El sistema extrapiramidal incluye todas las vías descendentes que no son el tracto corticoespinal:

Tracto rubroespinal: Control de movimientos de las extremidades superiores.
Tracto vestíbuloespinal: Control del equilibrio y la postura.
Tracto retículoespinal: Modulación de la actividad de las motoneuronas y el tono muscular.
Tracto tectoespinal: Orientación de la cabeza y los ojos hacia estímulos visuales.

Ambos sistemas trabajan de forma integrada, con el sistema piramidal proporcionando el control fino y el extrapiramidal ajustando la postura y el tono muscular de fondo.

4.2.3. Integración sensorial y control de la coordinación.

El control motor eficaz requiere la integración continua de información sensorial de múltiples fuentes. Esta integración permite ajustar los movimientos en tiempo real y adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno.

4.2.3.1. Propiocepción.

La propiocepción es la percepción de la posición y el movimiento del cuerpo en el espacio. Se basa en señales de:

Husos musculares: Detectan cambios en la longitud muscular y su velocidad.
Órganos tendinosos de Golgi: Detectan la tensión muscular.
Receptores articulares: Informan sobre el ángulo y la presión en las articulaciones.

La propiocepción es esencial para la coordinación motora, permitiendo ajustes finos sin necesidad de control visual consciente.

4.2.3.2. Sistema vestibular.

El sistema vestibular, ubicado en el oído interno, detecta la posición y el movimiento de la cabeza en el espacio a través de los canales semicirculares (movimientos rotacionales) y los órganos otolíticos (aceleración lineal y gravedad). Su información es fundamental para el equilibrio y la estabilidad postural.

4.2.3.3. Visión.

La visión proporciona información sobre el entorno y la posición del cuerpo en relación con los objetos. Es especialmente importante en deportes que requieren seguimiento de objetos en movimiento (pelotas, adversarios) y en la planificación de movimientos de alcance.

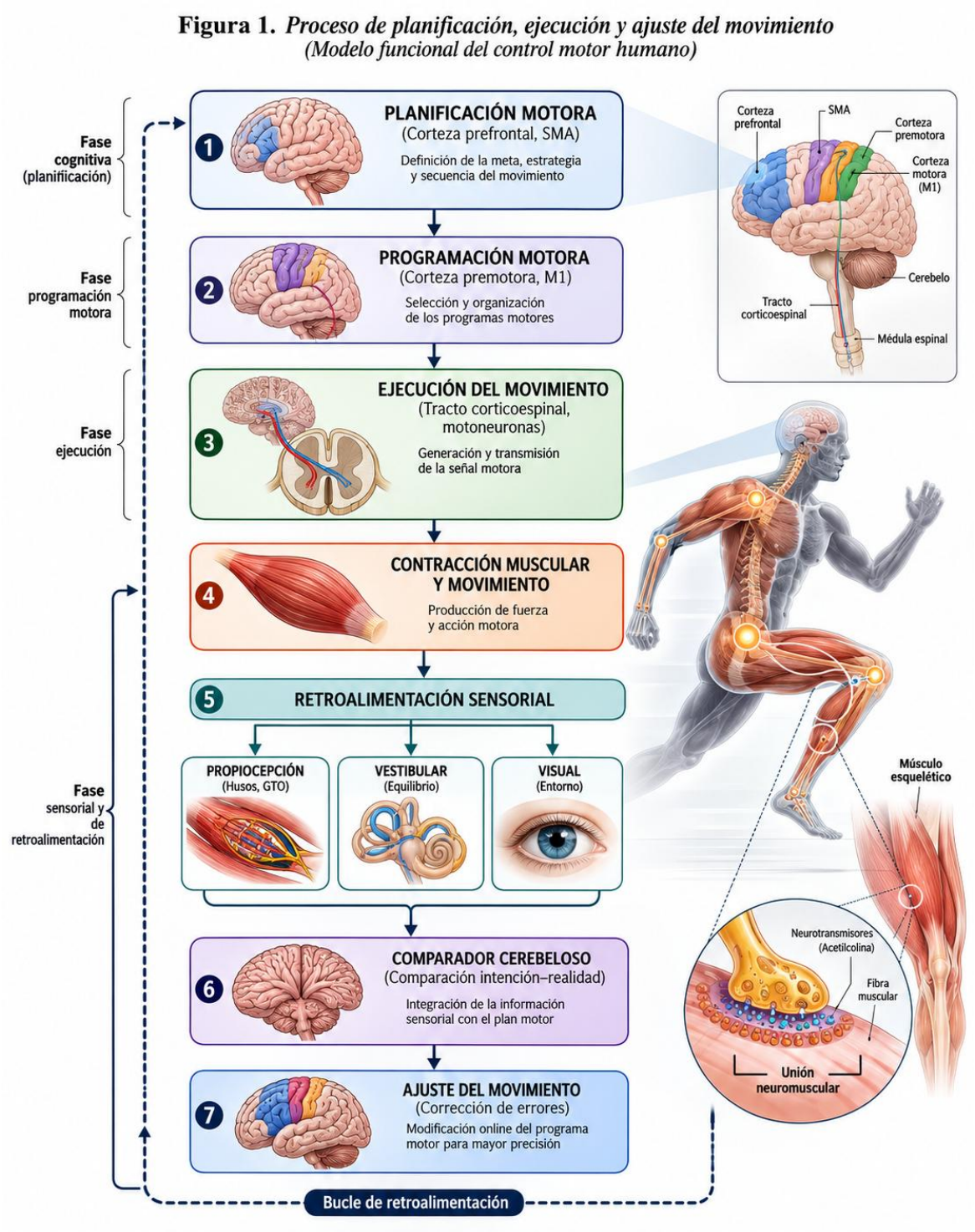
4.2.3.4. Integración sensoriomotora.

La integración de estas señales sensoriales ocurre en múltiples niveles:

Nivel espinal: Reflejos y ajustes locales.
Nivel del tronco encefálico: Control postural y equilibrio.
Nivel del cerebelo: Comparación entre la intención motora y la información sensorial, corrección de errores.
Nivel cortical: Planificación y ajuste de estrategias motoras.

Figura 1.

Bucle sensoriomotor para el control de la coordinación



Nota: Este diagrama ilustra el bucle de control sensoriomotor, donde la información sensorial (propioceptiva, vestibular y visual) se integra en el cerebelo para comparar la intención motora con el movimiento real, permitiendo ajustes en tiempo real.

4.2.4. Teorías del control motor.

Diversos marcos teóricos han intentado explicar cómo el sistema nervioso controla el movimiento. A continuación, se presentan las principales teorías:

4.2.4.1. Teoría de la programación motora (reflejo o jerárquica).

Esta teoría clásica propone que el movimiento se controla mediante programas motores almacenados en el sistema nervioso central. Un programa motor es un conjunto de comandos preestructurados que, una vez iniciados, se ejecutan de forma automática sin necesidad de retroalimentación sensorial. Es útil para explicar movimientos rápidos como un reflejo o un saque de tenis, donde no hay tiempo para la retroalimentación.

4.2.4.2. Teoría de sistemas.

La teoría de sistemas propone que el control motor emerge de la interacción de múltiples subsistemas (neural, musculoesquelético, sensorial, cognitivo) que trabajan de forma coordinada. El movimiento no está predeterminado, sino que es el resultado de la autoorganización del sistema en respuesta a las demandas del entorno.

4.2.4.3. Teoría de la acción dinámica.

La teoría de la acción dinámica enfatiza el papel de las leyes físicas y las propiedades del sistema musculoesquelético en la generación del movimiento. Los patrones de movimiento surgen de la interacción entre el organismo, la tarea y el entorno, sin necesidad de representaciones internas complejas.

4.2.4.4. Teoría del procesamiento distribuido en paralelo.

Esta teoría, basada en el funcionamiento de redes neuronales, propone que el control motor no es secuencial sino paralelo, con múltiples áreas cerebrales procesando información de forma simultánea. La evidencia actual apoya esta visión, mostrando que el control motor emerge de la interacción dinámica de múltiples circuitos cerebrales.

4.2.4.5. Teoría del control óptimo y de la retroalimentación óptima.

Propone que el sistema nervioso selecciona la estrategia motora que minimiza el coste energético y maximiza la precisión, integrando información sensorial y predicciones internas.

4.2.5. Aprendizaje motor y neuroplasticidad.

El aprendizaje motor es el proceso por el cual la práctica y la experiencia producen cambios relativamente permanentes en la capacidad para realizar movimientos hábiles. Estos cambios son posibles gracias a la neuroplasticidad, la capacidad del sistema nervioso para modificar su estructura y función.

4.2.5.1. Mecanismos de la neuroplasticidad motora.

Los principales mecanismos de plasticidad en el sistema motor incluyen:

- Potenciación a largo plazo (LTP): Fortalecimiento de las conexiones sinápticas en M1 y el cerebelo.
- Reorganización cortical: Expansión de las representaciones corticales de las habilidades entrenadas.
- Cambios en la excitabilidad corticoespinal: Aumento de la eficiencia de la transmisión desde M1 a las motoneuronas.
- Mielinización: Aumento de la velocidad de conducción en las vías motoras.

4.2.6. Fases del aprendizaje motor.

El aprendizaje motor progresa a través de tres fases (Fitts y Posner):

- Fase cognitiva: Comprensión de la tarea, alta demanda atencional, errores frecuentes.
- Fase asociativa: Refinamiento del movimiento, reducción de errores, mayor consistencia.
- Fase autónoma: Ejecución automática, mínima atención consciente, alta precisión.

Los cambios en la contribución relativa del cerebelo, los ganglios basales y la corteza motora varían a lo largo de estas fases. El cerebelo es especialmente activo en las fases iniciales (aprendizaje por error), mientras que los ganglios basales y la corteza motora son más importantes en la automatización.

A continuación se detallan las fases, sus características y aplicación en el entrenamiento deportivo

Fase cognitiva (Fase de comprensión)

Características generales

La fase cognitiva es la etapa inicial del aprendizaje motor. El deportista o aprendiz se enfrenta a una tarea nueva y debe comprender qué debe hacer, cómo ejecutarlo y qué objetivos persigue. Esta fase se caracteriza por:

- Alta demanda atencional: El aprendiz debe pensar conscientemente en cada paso del movimiento. La atención se dirige a los aspectos más básicos de la tarea, como la posición del cuerpo, la dirección del movimiento y la secuencia de acciones.
- Errores frecuentes y variables: La ejecución es inconsistente, con errores tanto en la precisión como en la coordinación. El aprendiz comete errores que pueden ser grandes o pequeños, y suele tener dificultades para repetir un movimiento exitoso.
- Uso intensivo de la memoria de trabajo: Se requieren instrucciones verbales, demostraciones visuales y retroalimentación externa para guiar la acción. El aprendiz debe recordar y procesar información sobre la tarea mientras la ejecuta.
- Comprensión de la tarea: El aprendiz desarrolla una representación mental o "esquema" de la tarea, identificando los componentes clave del movimiento y las reglas que lo rigen.
- Alta activación de la corteza prefrontal y la corteza premotora: Estas áreas están implicadas en la planificación, la atención y el control ejecutivo.

Correlatos neurales

Durante la fase cognitiva, se observa una alta activación de:

- Corteza prefrontal dorsolateral (CPFDL): Implicada en la planificación, la memoria de trabajo y el control atencional. El aprendiz debe mantener en mente las instrucciones y planificar la secuencia de movimientos.
- Corteza premotora (PM): Participa en la selección y organización de secuencias motoras basadas en estímulos externos.
- Cerebelo: Especialmente activo en el aprendizaje por error. El cerebelo compara la intención motora con la ejecución real y genera señales de corrección
- Corteza parietal posterior: Implicada en la integración de información sensorial (propioceptiva y visual) para guiar el movimiento.

Cambios en el rendimiento

- Velocidad: El movimiento es lento y vacilante.

- Precisión: Baja, con errores frecuentes.
- Coordinación: Pobre, con movimientos segmentados y falta de fluidez.
- Consistencia: Baja; el aprendiz no puede repetir un movimiento exitoso de manera confiable.
- Transferencia: Limitada; el aprendiz tiene dificultades para aplicar la habilidad en contextos diferentes.

Implicaciones para el entrenamiento

Durante la fase cognitiva, el entrenador debe:

- Proporcionar instrucciones claras y detalladas, desglosando la tarea en componentes manejables.
- Utilizar demostraciones visuales para facilitar la comprensión.
- Ofrecer feedback externo frecuente y específico, centrado en los errores más relevantes.
- Reducir la complejidad de la tarea si es necesario (ej. utilizar ejercicios simplificados o modificados).
- Fomentar la atención consciente en los aspectos clave del movimiento.
- Evitar la sobrecarga de información, ya que la memoria de trabajo tiene capacidad limitada.

Fase asociativa (Fase de refinamiento)

Características generales

La fase asociativa es la etapa intermedia del aprendizaje motor. El aprendiz comienza a refinar el movimiento, reduciendo errores y mejorando la consistencia. Se caracteriza por:

- Menor demanda atencional: El aprendiz puede prestar atención a otros aspectos del entorno o de la tarea, aunque el movimiento aún requiere cierto control consciente.
- Reducción de errores: Los errores se vuelven menos frecuentes y más pequeños. El aprendiz puede corregir errores basándose en la retroalimentación.
- Mayor consistencia: El movimiento se vuelve más reproducible, con menor variabilidad entre ensayos.
- Integración de la retroalimentación: El aprendiz utiliza la retroalimentación para ajustar el movimiento, desarrollando una mejor comprensión de las relaciones entre la acción y el resultado.

- Activación de los ganglios basales y el cerebelo: Estas estructuras participan en la automatización parcial del movimiento y en la corrección de errores.

Correlatos neurales

Durante la fase asociativa, se observa:

- Disminución de la activación prefrontal: La planificación y el control ejecutivo son menos necesarios a medida que el movimiento se vuelve más familiar.
- Aumento de la activación de los ganglios basales: Implicados en la selección y automatización de secuencias motoras.
- Activación del cerebelo: Continúa desempeñando un papel en la corrección de errores y el ajuste fino del movimiento.
- Reorganización de la corteza motora: Se produce una expansión de la representación cortical de la habilidad entrenada.

Cambios en el rendimiento

- Velocidad: Aumenta, aunque aún puede ser inferior a la velocidad de un experto.
- Precisión: Mejora significativamente; los errores son menos frecuentes.
- Coordinación: Mejora; los movimientos son más fluidos y coordinados.
- Consistencia: Aumenta; el aprendiz puede ejecutar el movimiento de manera más fiable.
- Transferencia: Mejora; el aprendiz puede aplicar la habilidad en contextos ligeramente diferentes.

Implicaciones para el entrenamiento

Durante la fase asociativa, el entrenador debe:

- Reducir la frecuencia del feedback externo para fomentar la autoevaluación y la autorregulación.
- Introducir variabilidad en la práctica (diferentes contextos, velocidades, superficies) para mejorar la transferencia.
- Aumentar la dificultad de la tarea de forma progresiva (ej. añadir presión temporal o distracciones).
- Fomentar la práctica deliberada, centrada en aspectos específicos del movimiento que requieren mejora.
- Utilizar feedback intrínseco (propioceptivo) para que el aprendiz desarrolle una mejor sensación del movimiento.

Fase autónoma (Fase de automatización)

Características generales

La fase autónoma es la etapa avanzada del aprendizaje motor. El movimiento se ejecuta de forma automática, con mínima intervención consciente. Se caracteriza por:

- Baja demanda atencional: El movimiento se ejecuta sin esfuerzo cognitivo aparente. El aprendiz puede realizar la tarea mientras atiende a otros estímulos (ej. hablar mientras conduce).
- Alta consistencia y precisión: El movimiento es estable, preciso y eficiente.
- Automatización: La habilidad se ejecuta mediante circuitos neurales especializados, sin necesidad de control consciente.
- Activación predominante de los ganglios basales y el cerebelo: Estas estructuras sustentan la ejecución automática y la coordinación fluida.
- Reducción de la activación prefrontal y premotora: La planificación y el control ejecutivo se minimizan.

Correlatos neurales

Durante la fase autónoma, se observa:

- Reducción de la activación de la corteza prefrontal y la corteza premotora. La planificación y el control ejecutivo se minimizan.
- Activación predominante de los ganglios basales (estriado, globo pálido) en la selección y ejecución de secuencias motoras.
- Activación del cerebelo en la coordinación y el ajuste fino de la ejecución.
- Reorganización cortical consolidada: Las representaciones corticales de la habilidad están plenamente establecidas.
- Aumento de la mielinización de los axones implicados en las vías motoras, mejorando la velocidad de conducción.

Cambios en el rendimiento

- Velocidad: Alta; el movimiento se ejecuta de forma rápida y eficiente.
- Precisión: Muy alta; los errores son raros y pequeños.
- Coordinación: Excelente; los movimientos son fluidos y sincronizados.
- Consistencia: Máxima; la ejecución es estable y fiable.
- Transferencia: Alta; la habilidad puede aplicarse en una amplia variedad de contextos.
- Robustez: La habilidad se mantiene incluso bajo condiciones de estrés o fatiga.

4.2.7. Implicaciones para el entrenamiento.

Durante la fase autónoma, el entrenador debe:

- Mantener la habilidad mediante práctica de mantenimiento, evitando la pérdida de la automatización.
- Introducir situaciones de presión y estrés (ej. competiciones simuladas) para consolidar la automatización en condiciones reales.
- Fomentar la flexibilidad y adaptabilidad mediante la variabilidad de la práctica.
- Enfatizar el entrenamiento táctico y estratégico, ya que la atención del deportista está liberada para aspectos más complejos del juego.
- Utilizar feedback retardado y reducido para fomentar la capacidad de autoevaluación.
- Incorporar ejercicios de doble tarea para entrenar la atención dividida y la automatización.

4.2.8. Principios del entrenamiento basados en la neuroplasticidad.

La evidencia actual sugiere que el entrenamiento debe incorporar:

- Práctica variada: Mejora la transferencia y la adaptabilidad.
- Práctica distribuida: Favorece la consolidación de la memoria motora.
- Retroalimentación (feedback): Esencial para la corrección de errores.
- Dificultad progresiva: Estimula la plasticidad continua.
- Descanso y sueño: Favorecen la consolidación.

4.2.9. Aplicaciones prácticas para el entrenamiento y la rehabilitación.

A partir de la evidencia revisada, se proponen las siguientes recomendaciones prácticas:

1. Diseñar tareas que desafíen la integración sensoriomotora. Incluir ejercicios que requieran la integración de información visual, propioceptiva y vestibular (ej. ejercicios de equilibrio con seguimiento visual).
2. Utilizar la variabilidad de la práctica para mejorar la transferencia. La práctica variable (diferentes contextos, velocidades, superficies) mejora la adaptabilidad a situaciones cambiantes.
3. Proporcionar retroalimentación específica y relevante. La retroalimentación debe centrarse en aspectos concretos del movimiento y ofrecerse de forma inmediata.

4. Periodizar la dificultad de las tareas. La progresión gradual en la complejidad de los movimientos estimula la plasticidad continua y previene el estancamiento.
5. Fomentar el sueño y el descanso. El sueño es esencial para la consolidación de los aprendizajes motores. Evitar entrenamientos nocturnos intensos y recomendar una higiene del sueño adecuada.
6. Incluir ejercicios aeróbicos de intensidad moderada. El ejercicio aeróbico incrementa los niveles de BDNF, que favorece la plasticidad sináptica y la neurogénesis.
7. Aprovechar los períodos sensibles del desarrollo. La infancia y la adolescencia son momentos de máxima plasticidad, ideales para la adquisición de habilidades motoras fundamentales.
8. En rehabilitación, utilizar los principios del aprendizaje motor: práctica repetida, transferencia gradual y tareas funcionales significativas.

4.2.10. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras.

A pesar del avance en la comprensión del control motor, existen limitaciones importantes:

- La mayoría de los estudios se han realizado en condiciones de laboratorio, con tareas simplificadas que no reflejan la complejidad de los deportes reales. Se necesitan investigaciones de campo con mayor validez ecológica.
- La interacción entre los diferentes niveles de la jerarquía motora (corteza, ganglios basales, cerebelo, médula espinal) no se comprende completamente en situaciones de movimiento complejo.
- No se han analizado suficientemente las diferencias individuales (sexo, edad, genética, tipo de deporte) en el control motor y la plasticidad.
- El papel de la cognición (atención, memoria de trabajo, toma de decisiones) en el control motor necesita más investigación, especialmente en contextos de alta presión competitiva.
- Las técnicas de neuroimagen (fMRI, fNIRS, EEG) aplicadas al deporte aún son limitadas en su uso práctico durante el entrenamiento y la competición.

Futuras líneas de investigación deberían explorar: (a) el uso de neuroimagen portátil para estudiar la actividad cerebral durante el movimiento en tiempo real; (b) el desarrollo de modelos computacionales que integren los diferentes niveles del sistema motor; (c) la interacción entre los sistemas motor, cognitivo y emocional en el rendimiento deportivo; (d) el papel de la

epigenética en las adaptaciones motoras; y (e) el desarrollo de protocolos de entrenamiento personalizados basados en perfiles neurofisiológicos.

4.3. CONCLUSIONES

El control motor y la coordinación de movimientos son funciones complejas que emergen de la interacción dinámica de múltiples estructuras del sistema nervioso. La organización jerárquica del sistema motor, desde la corteza cerebral hasta las motoneuronas espinales, permite la planificación, ejecución y regulación de movimientos voluntarios con una precisión y adaptabilidad notables.

La corteza motora primaria (M1) constituye la principal vía de salida del sistema motor, mientras que los ganglios basales participan en la selección de acciones adecuadas y la automatización. El cerebelo actúa como un sistema de comparación y corrección de errores, esencial para la coordinación fina y el aprendizaje motor. La integración de información sensorial (propioceptiva, vestibular y visual) permite ajustar los movimientos en tiempo real y adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno.

El aprendizaje motor, mediado por la neuroplasticidad, permite la adquisición y consolidación de habilidades motoras a lo largo de la vida. Los mecanismos de plasticidad, como la potenciación a largo plazo, la reorganización cortical y los cambios en la excitabilidad corticoespinal, sustentan las mejoras en el rendimiento inducidas por el entrenamiento.

Es importante comprender las bases neurológicas del control motor y la coordinación permite diseñar programas de entrenamiento más efectivos, seguros y personalizados, reconociendo que el movimiento humano es el resultado de la integración de procesos neurales, sensoriales y cognitivos. Este conocimiento es esencial para profesionales de la educación física, el deporte y la rehabilitación, ya que les permite implementar el entrenamiento desde una perspectiva científica y holística, promoviendo no solo el rendimiento deportivo, sino también la salud y el bienestar general.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bastian, A. J. (2006). Learning to predict the future: the cerebellum adapts feedforward movement control. Current Opinion in Neurobiology, 16(6), 645-649. https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.08.016

Bostan, A. C., & Strick, P. L. (2018). The basal ganglia and the cerebellum: nodes in an integrated network. Nature Reviews Neuroscience, 19(6), 338-350. https://doi.org/10.1038/s41583-018-0002-7

Dayan, E., & Cohen, L. G. (2011). Neuroplasticity subserving motor skill learning. Neuron, 72(3), 443-454. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.008

Doyon, J., & Benali, H. (2005). Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. Current Opinion in Neurobiology, 15(2), 161-167. https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.03.004

Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). Human performance. Brooks/Cole.

Galea, J. M., & Miall, R. C. (2019). A cerebellar mechanism for learning motor skills. Nature Reviews Neuroscience, 20(7), 411-422. https://doi.org/10.1038/s41583-019-0167-8

Georgopoulos, A. P., & Carpenter, A. F. (2015). Coding of movements in the motor cortex. Current Opinion in Neurobiology, 33, 34-39. https://doi.org/10.1016/j.conb.2015.01.012

Hackney, A. C. (2020). Exercise and the neuroendocrine system. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55250-3

Kandel, E. R., Schwartz, J. H., & Jessell, T. M. (2021). Principles of neural science (6th ed.). McGraw-Hill.

Kleim, J. A., & Jones, T. A. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity: implications for rehabilitation after brain damage. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 51(1), S225-S239. https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/018)

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

McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2015). Exercise physiology: Nutrition, energy, and human performance (8th ed.). Wolters Kluwer.

Nielsen, J. B., & Bellardita, C. (2025). Sensorimotor Control. Motor Control, 29(3), 236-273. https://doi.org/10.1007/s10827-025-00888-6

Proville, R. D., Spolidoro, M., Guyon, N., Dugué, G. P., Selimi, F., & Isope, P. (2014). Cerebellum involvement in cortical sensorimotor circuits for the control of voluntary movements. Nature Neuroscience, 17(9), 1233-1239. https://doi.org/10.1038/nn.3773

Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2019). Motor Learning and Performance: From Principles to Application (6th ed.). Human Kinetics.

Sclafani, A., Pagliaro, A., Alioto, A., & Boatta, A. (2026). Biochemical Pathways of Neuroplasticity in Sport Skill Acquisition: From Neuroscience to Coaching Practice. MDPI, 28(2), 145-162. https://doi.org/10.3390/ijms28020145

Shadmehr, R., & Krakauer, J. W. (2008). A computational neuroanatomy for motor control. Experimental Brain Research, 185(3), 359-381. https://doi.org/10.1007/s00221-008-1280-5

Strick, P. L., Dum, R. P., & Fiez, J. A. (2009). Cerebellum and nonmotor function. Annual Review of Neuroscience, 32, 413-434. https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.31.060407.125606

Voss, M. W., Vivar, C., Kramer, A. F., & van Praag, H. (2013). Bridging animal and human models of exercise-induced brain plasticity. Trends in Cognitive Sciences, 17(10), 525-544. https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.08.001

Williams, A. M., & Ward, P. (2007). Anticipation and decision making: exploring new horizons. En G. Tenenbaum & R. C. Eklund (Eds.), Handbook of sport psychology (3rd ed., pp. 203-223). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118270011.ch9

PARTE II.

COGNICIÓN, EMOCIÓN Y RENDIMIENTO

CAPITULO 5:ATENCIÓN, PERCEPCIÓN Y TOMA DE DECISIONES EN EL DEPORTE. AUTOR: Lcdo. Jorge Luis Serrano Aguilar, Msc.

ATENCIÓN, PERCEPCIÓN Y TOMA DE DECISIONES EN EL DEPORTE.

ATTENTION, PERCEPTION AND DECISION MAKING IN SPORTS.

Autor: Lcdo. Jorge Luis Serrano Aguilar, Msc.

CORREO: jserrano@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6810-107X

Resumen

La atención, la percepción y la toma de decisiones constituyen procesos cognitivos fundamentales que determinan el rendimiento deportivo en todas sus manifestaciones. Este capítulo revisa la evidencia actual sobre los mecanismos neurobiológicos y psicológicos que subyacen a estos procesos, analizando su interrelación y su influencia en el comportamiento del deportista durante la competición. Se describen los tipos de atención (selectiva, sostenida, dividida y alternante), los mecanismos perceptivos (visual, auditivo y propioceptivo) y los modelos explicativos de la toma de decisiones (cognitivos, ecológicos e integradores). Además, se examina la influencia de factores emocionales, como la ansiedad competitiva, y se derivan estrategias prácticas de entrenamiento cognitivo para entrenadores y preparadores físicos. Finalmente, se discuten las limitaciones de la investigación actual y se proponen futuras líneas de estudio.

Palabras clave: atención, percepción, toma de decisiones, rendimiento deportivo, cognición, deporte.

Abstract

Attention, perception, and decision-making are fundamental cognitive processes that determine athletic performance in all its manifestations. This chapter reviews the current evidence on the neurobiological and psychological mechanisms underlying these processes, analyzing their interrelationship and their influence on athletic behavior during competition. It describes the types of attention (selective, sustained, divided, and alternating), the perceptual mechanisms (visual, auditory, and proprioceptive), and the explanatory models of decision-making (cognitive, ecological, and integrative). Furthermore, it examines the influence of emotional factors, such as competitive anxiety, and derives practical cognitive training strategies for coaches and physical trainers. Finally, it discusses the limitations of current research and proposes future lines of inquiry.

Keywords: attention, perception, decision making, sports performance, cognition, sport.

5.1. INTRODUCCIÓN

El rendimiento deportivo ha sido tradicionalmente analizado desde una perspectiva predominantemente física, considerando la fuerza, la velocidad y la técnica como los únicos factores determinantes del éxito. Sin embargo, en las últimas décadas, la psicología del deporte y la neurociencia cognitiva han demostrado que los procesos mentales superiores (atención, percepción y toma de decisiones) son igualmente determinantes en la ejecución de acciones deportivas eficaces (Williams & Ward, 2007; Moran, 2016).

La atención, la percepción y la toma de decisiones conforman un núcleo cognitivo único que guía la conducta del deportista en situaciones de competición real. Estos procesos, que ocurren en fracciones de segundo, pueden determinar el éxito o el error en cada acción. Cada pase, cada cambio de táctica y cada ajuste motor nacen inicialmente en la mente del deportista antes de hacerse realidad en un movimiento. Por ello, el análisis de dichos procesos no solo es importante, sino imprescindible para la comprensión integral del deporte (Williams & Ward, 2007).

El objetivo principal de este capítulo es profundizar en el papel que desempeña la atención, la percepción y la toma de decisiones en el deporte, abordándolos desde sus fundamentos teóricos hasta sus aplicaciones prácticas. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir los tipos de atención y su influencia en el rendimiento deportivo; (2) analizar los mecanismos perceptivos implicados en la práctica deportiva; (3) explicar los modelos teóricos de la toma de decisiones en el deporte; (4) examinar la interrelación entre estos procesos cognitivos; (5) evaluar la influencia de la ansiedad competitiva en los procesos cognitivos; y (6) derivar estrategias prácticas de entrenamiento cognitivo para entrenadores y preparadores físicos.

5.2. DESARROLLO

5.2.1. Fundamentos neurobiológicos de la atención, la percepción y la toma de decisiones.

Los procesos cognitivos que guían la acción deportiva están sustentados por una compleja red de estructuras cerebrales que trabajan de forma integrada.

5.2.1.1. Sustrato neural de la atención.

La atención está mediada por tres redes neurales principales (Posner & Petersen, 1990):

Red de alerta: Mantiene el estado de vigilancia y preparación para responder a estímulos. Involucra el tronco encefálico (locus coeruleus) y el tálamo.

Red de orientación: Dirige la atención hacia estímulos relevantes en el espacio. Involucra los colículos superiores, el tálamo y la corteza parietal.

Red ejecutiva: Controla la atención voluntaria, la inhibición de distracciones y la resolución de conflictos. Involucra la corteza prefrontal dorsolateral y la corteza cingulada anterior.

5.2.1.2. Sustrato neural de la percepción.

La percepción implica el procesamiento de información sensorial en las cortezas primarias (visual, auditiva, somatosensorial) y su integración en áreas de asociación (lóbulo parietal, corteza temporal). La percepción visual, la más relevante en el deporte, involucra la vía dorsal (procesamiento del "dónde" y del movimiento) y la vía ventral (procesamiento del "qué" y la identificación) (Ungerleider & Mishkin, 1982).

5.2.1.3. Sustrato neural de la toma de decisiones.

La toma de decisiones en contextos deportivos implica la activación de la corteza prefrontal (planificación y evaluación), los ganglios basales (selección de acciones) y el cerebelo (coordinación y ajuste motor). El sistema dopaminérgico (vía mesolímbica y nigroestriatal) modula la motivación y el aprendizaje por refuerzo, influyendo en la calidad de las decisiones (Dayan & Cohen, 2011).

5.2.2. La atención como proceso cognitivo fundamental en el deporte.

La atención se define como la facultad del ser humano para seleccionar y mantener el foco mental en determinados estímulos e informaciones, mientras se descartan los estímulos irrelevantes (Perrey, 2022). En el ámbito deportivo, esta facultad adquiere una importancia significativa debido a la gran cantidad de información que el deportista debe procesar de manera simultánea.

El deporte representa un entorno altamente exigente en cuanto a la atención, caracterizado por la velocidad, la incertidumbre y la presión constante. Un deportista rara vez actúa en condiciones estables; por el contrario, debe responder mientras escucha al público, siente agotamiento físico, atiende indicaciones externas y enfrenta a su oponente. En dicho escenario, la atención se convierte en un recurso valioso que debe ser gestionado de forma eficiente (Moran, 2016).

5.2.3. Tipos de atención en el deporte.

En la psicología deportiva, se reconocen múltiples tipos de atención que influyen directamente en el rendimiento (Quezada-Vargas & Torres, 2025):

Tipo de atención	Definición	Sustrato neural	Ejemplo deportivo
Atención selectiva	Capacidad para concentrarse en estímulos relevantes e inhibir distracciones	Corteza prefrontal, lóbulo parietal	Un arquero se focaliza en el balón y la postura del ejecutante durante un penal, ignorando el ruido del público
Atención sostenida	Mantener la concentración en periodos prolongados	Corteza prefrontal, locus coeruleus	Un ciclista o nadador de larga distancia mantiene el foco durante toda la prueba
Atención dividida	Procesar varios estímulos de forma simultánea	Corteza prefrontal dorsolateral, ganglios basales	Un futbolista controla el balón, observa a sus compañeros y anticipa los movimientos del rival
Atención alternante	Cambiar el foco atencional según las demandas de la situación	Corteza prefrontal ventrolateral	Un jugador de baloncesto pasa de atacar a defender en segundos

5.2.4. Factores que influyen en la atención deportiva.

La atención no es un proceso aislado ni constante, sino que se ve afectada por distintos factores internos y externos (Eason et al., 2024).

Factores internos:

Motivación: Un deportista motivado mantiene mejor la atención.

Ansiedad: La ansiedad excesiva puede estrechar y rigidizar el foco atencional, provocando la pérdida de información relevante.

Autoconfianza: La creencia en las propias capacidades facilita el control atencional.

Nivel de activación: Un nivel moderado de activación favorece una atención amplia y flexible; niveles extremos (hipo o hiperactivación) la deterioran.

Factores externos:

Entorno competitivo: El ruido, el público y las condiciones ambientales pueden interferir.

Marcador: La situación del partido influye en la atención (ej. ir ganando o perdiendo).

Relevancia del evento: Partidos decisivos aumentan la presión atencional.

5.2.5. Entrenamiento de la atención en el deporte.

En la actualidad, el entrenamiento de la atención es una práctica habitual en los programas de preparación psicológica. Se emplean técnicas como (Abreu & Cañizares, 2021):

Visualización: Ensayo mental de la ejecución para reforzar los patrones atencionales.

Respiración consciente: Técnicas de respiración diafragmática para regular la activación y el foco atencional.

Mindfulness deportivo: Entrenamiento en atención plena para mantener el foco en el momento presente.

Entrenamiento con NeuroTracker: Ejercicios de seguimiento de múltiples objetos para mejorar la atención dividida y la percepción visual.

5.2.6. La percepción como proceso interpretativo del entorno deportivo.

La percepción es el proceso a través del cual el deportista organiza y da significado a la información sensorial que recibe del ambiente (Prieto & Ramirez, 2021). A diferencia de la simple sensación, la percepción implica un factor cognitivo que transforma los estímulos en información útil para la competición. En el deporte, percibir no es solo ver u oír, sino entender lo que está ocurriendo y anticipar lo que sucederá.

La percepción es una habilidad que distingue claramente a los deportistas más experimentados de aquellos que no lo son. Mientras un novato observa el juego de forma general, el deportista con experiencia percibe detalles sutiles o indicios tácticos del oponente (Williams & Ward, 2007). Esta capacidad perceptiva permite una respuesta más eficaz.

5.2.7. Percepción visual en el deporte.

La percepción visual es la fuente informativa más importante en casi todas las disciplinas deportivas. Mediante ella, el deportista identifica trayectorias, velocidades y distancias espaciales. Los deportistas de alto rendimiento desarrollan una mayor capacidad para extraer información de la periferia visual y para detectar detalles en entornos complejos (Mann et al., 2007).

En deportes como el baloncesto o el fútbol, el jugador debe percibir espacios libres, movimientos de compañeros y posiciones de los contrincantes. Esta facultad perceptiva no es innata, sino resultado de la experiencia y el entrenamiento sistemático. El seguimiento ocular (eye-tracking) ha demostrado que los deportistas expertos realizan patrones de exploración visual más eficientes, fijándose en las zonas de mayor información (Vickers, 2007).

5.2.8. Percepción auditiva y propioceptiva.

Además de la visión, la percepción auditiva desempeña un papel significativo al permitir captar indicaciones, señales del ambiente y cambios en el nivel del juego (Stanton & Spence, 2020). La propiocepción, por su parte, informa al deportista acerca de la posición y el movimiento de su propio cuerpo, facilitando el control motor, el equilibrio y la coordinación.

La propiocepción permite al deportista sentir su cuerpo en movimiento, ajustando sus acciones sin requerir un control consciente constante. Su entrenamiento es esencial en deportes que requieren precisión y control postural (ej. gimnasia, patinaje, esquí).

5.2.9. Influencia emocional en la percepción.

Las emociones inciden directamente en la manera en que el deportista percibe el ambiente. Los estados emocionales negativos, como la ansiedad, pueden distorsionar la percepción, generando que las amenazas sean percibidas con más frecuencia que las oportunidades (Mohanty et al., 2025). Por lo tanto, la regulación emocional es un componente necesario en el entrenamiento perceptivo.

5.2.10. Tipos de percepción temporal en el deporte.

Es importante distinguir entre la percepción visual y la percepción del tiempo durante la competición (Díaz-Rodríguez et al., 2024):

> Percepción rápida del tiempo: Ocurre cuando el deportista percibe que el tiempo pasa rápidamente. Predomina en estados de emociones positivas y flujo (flow). Puede llevar a decisiones impulsivas si no se gestiona adecuadamente.

Percepción lenta del tiempo: El deportista percibe que el tiempo transcurre de manera lenta, frecuentemente bajo estados emocionales negativos (ansiedad, fatiga). Puede provocar indecisión y errores tácticos.

5.2.11. La toma de decisiones en el contexto deportivo.

La toma de decisiones constituye uno de los procesos cognitivos más complejos y determinantes en el rendimiento deportivo. Se define como el mecanismo mediante el cual el deportista selecciona una acción específica entre diversas alternativas posibles, basándose en la información previamente percibida (Magno et al., 2025). En el deporte, este proceso ocurre generalmente en condiciones de presión temporal y carga emocional, incrementando notablemente su dificultad.

Cada acción deportiva es, en esencia, una decisión. Aquellos comportamientos que parecen automáticos han sido previamente atendidos, procesados y almacenados por el sistema cognitivo del deportista. La diferencia entre un deportista experto y uno novato no radica solamente en la velocidad de ejecución, sino en la oportunidad y calidad de sus decisiones (Williams & Ward, 2007).

5.2.12. Características de la toma de decisiones en el deporte.

La toma de decisiones deportiva presenta características particulares que la diferencian de otros contextos (Janssen et al., 2025):

Rapidez: Muchas decisiones deben tomarse en fracciones de segundo.

Incertidumbre: El deportista no dispone de información completa del entorno.

Presión emocional: El resultado tiene consecuencias significativas para el deportista y su equipo.

Fatiga física y mental: Afecta la claridad cognitiva y la calidad decisional.

Interacción social: En deportes colectivos, las decisiones implican coordinación con otros.

5.2.13. Toma de decisiones consciente y automática.

En el deporte se distinguen dos grandes formas de toma de decisiones (García-Martínez et al., 2022):

Toma de decisiones consciente: Ocurre cuando el deportista examina deliberadamente las opciones disponibles, evalúa las consecuencias y selecciona la respuesta más acertada. Es frecuente en situaciones novedosas o poco entrenadas.

Toma de decisiones automática: Se basa en patrones previamente aprendidos y consolidados mediante la práctica. La respuesta surge de forma rápida e intuitiva. La automatización no implica falta de pensamiento, sino un pensamiento eficiente, resultado de años de experiencia y entrenamiento.

La automatización de decisiones libera recursos atencionales, agilizando la adaptación a situaciones cambiantes. Sin embargo, puede convertirse en una desventaja si el deportista no es capaz de ajustar sus respuestas cuando el entorno lo exige (García-Martínez et al., 2022). Por ello, entrenar tanto la automatización como la flexibilidad cognitiva es esencial.

5.2.14. Factores que influyen en la toma de decisiones deportivas.

Factor	**Descripción**
Experiencia previa	Los deportistas con más experiencia poseen un repertorio de respuestas más amplio y preciso
Conocimiento táctico	Permite interpretar las situaciones de juego y anticipar acciones
Estado emocional	La ansiedad y el miedo pueden nublar la claridad decisional
Autoconfianza	Incide en la determinación y seguridad al actuar
Fatiga	Disminuye la capacidad de análisis y aumenta el riesgo de error
Presión temporal	La falta de tiempo puede llevar a decisiones subóptimas

5.2.15. Modelos teóricos de la toma de decisiones en el deporte.

Para comprender su complejidad, diversos marcos teóricos han sido desarrollados desde la psicología y las ciencias del deporte (Díaz-Rodríguez et al., 2024):

Modelos cognitivos: Sostienen que el deportista procesa la información de forma secuencial: percepción del estímulo → análisis → decisión → ejecución. Destacan la relevancia de la memoria, la atención y el conocimiento previo. Son útiles para comprender el aprendizaje en etapas formativas y la adquisición de habilidades.

Modelos ecológicos: Proponen la toma de decisiones como una interacción directa entre el deportista y el ambiente, sin necesidad de un procesamiento cognitivo constante. El entorno ofrece oportunidades de acción (affordances) que el deportista detecta y utiliza. Son especialmente valiosos para explicar el comportamiento de deportistas expertos.

Enfoque integrador: En la actualidad, la tendencia más aceptada combina elementos de los modelos cognitivos y ecológicos. Reconoce que la toma de decisiones deportiva es el resultado de procesos internos (memoria, atención, conocimiento) más la interacción con el ambiente. Esta visión refleja de forma más precisa la realidad del deporte, reconociendo al deportista como un ser activo, adaptativo y pensante.

5.2.16. Interrelación entre atención, percepción y toma de decisiones.

La atención, la percepción y la toma de decisiones no funcionan como procesos independientes, sino como un sistema cognitivo integrado que guía la conducta del deportista. La atención selecciona la información de mayor importancia, la percepción la interpreta y la toma de decisiones la transforma en acción (Yadav, 2023).

Esta interrelación explica por qué un fallo en cualquiera de estos procesos puede afectar notoriamente el rendimiento deportivo. Un deportista ansioso percibe de manera incompleta, y una percepción errónea conduce a decisiones deficientes (Mohanty et al., 2025). Cuando estos procesos funcionan de forma armónica, el rendimiento alcanza niveles óptimos.

Cuando la atención se dispersa, la percepción se vuelve confusa y la toma de decisiones se retrasa, lo que se traduce en errores técnicos, mala ubicación o respuestas inadecuadas. En deportes de alto nivel, estos errores tienen consecuencias visibles e instantáneas. Muchos fracasos deportivos no se deben únicamente a la falta de capacidad física, sino a una deficiente integración de los procesos cognitivos.

El entendimiento actual reconoce la necesidad de trabajar estos procesos de forma integrada. Estrategias como simulaciones, análisis de video y entrenamiento en realidad virtual permiten el desarrollo simultáneo de la atención, la percepción y la toma de decisiones.

Figura 1. *Flujo de procesamiento cognitivo en la acción deportiva*



Nota: Este diagrama ilustra el flujo continuo de procesamiento cognitivo durante la acción deportiva. La flecha de retroalimentación (feedback) muestra cómo el resultado de la acción influye en los procesos atencionales, perceptivos y decisionales en ensayos posteriores, permitiendo el aprendizaje y la mejora continua.

5.2.17. Ansiedad competitiva y su influencia en los procesos cognitivos.

La ansiedad competitiva se entiende como la interpretación de los eventos competitivos como amenaza, provocando en el deportista una respuesta de atención y activación ante dichos eventos. Se define como un estado emocional caracterizado por sentimientos de tensión y activación fisiológica ante la competición (Pina, 2021).

5.2.17.1. Tipos de ansiedad competitiva.

Ansiedad somática: Activación fisiológica del organismo, reflejada en sudoración, temblores, dilatación pupilar, aceleración del ritmo cardíaco y respiratorio. Esta activación puede interferir con el control motor y la percepción fina (Pina, 2021).

Ansiedad cognitiva: Procesos cognitivos mal elaborados, con errores en el procesamiento de información, falta de concentración, razonamiento deficiente y despersonalización. Afecta directamente a la toma de decisiones (Pina, 2021).

Autoconfianza: Valoración de la capacidad propia. Cuando la autoconfianza es baja, la influencia del clima deportivo, la motivación y la percepción pueden generar sentimientos negativos (Sabarit et al., 2023).

5.2.18. Consecuencias de la ansiedad sobre la atención, percepción y decisión.

La ansiedad excesiva produce un estrechamiento atencional (reducción del foco perceptivo), una distorsión de la percepción (mayor detección de amenazas) y una ralentización de la toma de decisiones (indecisión y errores). Por ello, el entrenamiento en regulación emocional y control de la ansiedad es esencial en los programas de preparación psicológica (Sabarit et al., 2023).

5.2.19. Habilidades cognitivas en el deporte.

El desarrollo de las capacidades cognitivas es de suma importancia para las habilidades de los deportistas, ya que determinan el rendimiento atlético en diversos deportes y repercuten en el progreso atlético de los participantes (Özen et al., 2024). Para un alto rendimiento deportivo, es fundamental que las funciones cognitivas como la atención, la toma de decisiones y la memoria funcionen de manera eficaz bajo entornos estresantes y desafiantes.

Las habilidades cognitivas se entienden como procesos psicológicos y neuropsicológicos de gran influencia en el deporte. La práctica deportiva regular mejora la velocidad de procesamiento, la memoria, la concentración y la capacidad de toma de decisiones (Gómez & Ortiz, 2025). Además, el deporte reduce el estrés y aumenta la confianza, contribuyendo al bienestar general del individuo.

5.2.20. Estrategias de entrenamiento cognitivo en el deporte.

Existen diversas estrategias para entrenar la atención, la percepción y la toma de decisiones en el contexto deportivo (Cumbicos, 2022):

5.2.20.1. Juegos modificados (Small-Sided Games - SSGs).

Los juegos modificados (SSGs) utilizan la misma dinámica del juego oficial, pero con reglas ajustadas para alcanzar objetivos específicos de entrenamiento cognitivo. Durante los entrenamientos, el entrenador debe integrar estas estrategias para optimizar el tiempo de práctica y favorecer el desarrollo cognitivo. Ejemplos: reducir el espacio de juego, aumentar o disminuir el número de jugadores, modificar las reglas de puntuación.

5.2.20.2. Enfoque Teaching Games for Understanding (TGfU) o enseñanza basada en el juego.

El enfoque TGfU prioriza la táctica y la toma de decisiones autónoma sobre la técnica aislada. Es un enfoque centrado en juegos modificados que puede variarse durante las sesiones de entrenamiento. Sus fases incluyen (Cumbicos, 2022):

1. Forma de juego: Desarrollo de juegos modificados basados en principios tácticos.
2. Enseñanza para la comprensión: Uso del cuestionamiento para explorar los diferentes panoramas del juego.
3. Habilidades para el desarrollo técnico: Tareas enfocadas en los requerimientos tácticos del juego.
4. Vuelta a la forma de juego: Integración de técnicas y tácticas a través de progresiones hasta el juego real.
5. Reflexión y conclusión: Cuestionamiento para consolidar el conocimiento táctico.

5.2.20.3. Otras estrategias de entrenamiento cognitivo.

Oclusión visual: Limitación temporal o espacial de la información visual para forzar la anticipación.

Entrenamiento neurocognitivo: Ejercicios con luces, colores o estímulos que requieren respuestas rápidas (ej. NeuroTracker, dispositivos de reacción).

Entrenamiento visual (eye-tracking): Mejora de la exploración visual y la anticipación motriz.

Simulación y análisis de video: Estudio de situaciones de juego para desarrollar la percepción y la toma de decisiones.

5.2.21. Atención, percepción y toma de decisiones en el deporte formativo.

El desarrollo de los procesos cognitivos es esencial para el aprendizaje integral del niño o joven deportista. Más allá del rendimiento físico, estas capacidades influyen en el desarrollo del pensamiento estratégico, la autorregulación y la resolución de problemas.

El deporte formativo no debe concentrarse solamente en los resultados, sino también en el proceso. Enseñar a los deportistas a observar, analizar y decidir fomenta una participación más consciente y significativa. Las estrategias TGfU y los juegos modificados son especialmente útiles en esta etapa, ya que promueven la toma de decisiones autónoma y el aprendizaje táctico (Cumbicos, 2022).

5.2.22. Atención, percepción y toma de decisiones en el deporte de alto rendimiento.

En el deporte de alto rendimiento, la atención, la percepción y la toma de decisiones alcanzan su máxima expresión y exigencia. En este nivel, las diferencias técnicas entre los deportistas suelen ser mínimas; por ende, el factor cognitivo se convierte en un determinante crítico. La mente del deportista se transforma en el principal elemento competitivo (Özen et al., 2024).

El alto rendimiento se caracteriza por escenarios altamente estructurados pero impredecibles, en donde cada segundo cuenta y cada error puede definir los resultados. En estas condiciones, el deportista debe mantener una atención selectiva y precisa, una percepción estructurada del entorno y una toma de decisiones flexible y adaptativa. No se trata solo de reaccionar, sino de anticipar y adaptarse.

Los deportistas de élite desarrollan una capacidad superior para filtrar estímulos irrelevantes y concentrarse únicamente en aquellos que influyen directamente en el rendimiento. Esta capacidad permite conservar energía, mantener el control durante períodos prolongados y responder de forma eficiente incluso bajo presión extrema. Dicha facultad no es innata, sino resultado de años de entrenamiento exhaustivo, experiencia competitiva y trabajo psicológico constante (Sabarit et al., 2023).

5.2.23. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras.

A pesar del avance en la comprensión de los procesos cognitivos en el deporte, existen limitaciones importantes:

La mayoría de los estudios se han realizado en condiciones de laboratorio, con tareas simplificadas que no reflejan la complejidad de los deportes reales. Se necesitan investigaciones de campo con mayor validez ecológica (Williams & Ward, 2007).

Los mecanismos neurales que subyacen a la toma de decisiones en tiempo real aún no se comprenden completamente. El uso de técnicas de neuroimagen portátil (fNIRS, EEG) durante la competición podría proporcionar información valiosa.

La interacción entre los factores emocionales y los procesos cognitivos necesita más investigación, especialmente en contextos de alta presión competitiva.

No se han analizado suficientemente las diferencias individuales (edad, sexo, nivel de entrenamiento, tipo de deporte) en los procesos atencionales, perceptivos y decisionales.

El efecto del entrenamiento cognitivo sobre el rendimiento deportivo real (no solo sobre tests de laboratorio) aún es controvertido. Se necesitan ensayos controlados con medidas de rendimiento en competición.

Futuras líneas de investigación deberían explorar el uso de realidad virtual y entornos inmersivos para el entrenamiento de la toma de decisiones, así como el desarrollo de herramientas de monitorización cognitiva en tiempo real para el entrenador.

5.3. CONCLUSIONES

La atención, la percepción y la toma de decisiones constituyen procesos cognitivos fundamentales que determinan el rendimiento deportivo en todas sus manifestaciones. La evidencia revisada demuestra que estos procesos influyen en cada acción que realizan los deportistas durante los juegos, y que su eficacia depende tanto de factores internos (motivación, ansiedad, autoconfianza) como externos (entorno, presión competitiva).

La atención desempeña un papel elemental al seleccionar la información relevante que recibe el deportista durante la competición. La percepción interpreta esta información para generar una representación significativa del entorno. Finalmente, la toma de decisiones transforma esta representación en una acción concreta y adaptativa. Si alguno de estos elementos falla, el desempeño de los jugadores se ve considerablemente afectado.

La atención en el deporte puede ser vulnerada por factores internos o externos. Debe existir una adecuada gestión que permita al atleta mantener un enfoque óptimo incluso bajo presión. Técnicas como la visualización, la respiración consciente y el mindfulness deportivo contribuyen a la concentración, ya que esta no depende solo del talento, sino que debe ser trabajada y estimulada sistemáticamente. El fortalecimiento de la atención mejora la ejecución y la respuesta ante la incertidumbre, consolidándose como una base sólida para el desarrollo del deportista.

La percepción es pieza clave en el deporte, ya que recibe estímulos sensoriales para comprender, anticipar y otorgar significado a cada situación presentada en el juego. Existen varios tipos de percepción (visual, auditiva, propioceptiva) que pueden verse influenciadas de manera directa por las emociones, pudiendo perjudicar la toma de decisiones. El entrenamiento perceptivo, mediante técnicas de oclusión visual y análisis de video, puede mejorar significativamente el rendimiento.

La toma de decisiones representa la culminación de los procesos cognitivos en el deporte, donde el deportista debe actuar con rapidez y bajo presión en escenarios de constante cambio. Los modelos cognitivos, ecológicos e integradores ofrecen marcos explicativos que permiten comprender y entrenar este proceso.

La ansiedad competitiva y otros factores emocionales modulan significativamente la atención, la percepción y la toma de decisiones. Por ello, el entrenamiento psicológico y la regulación emocional deben ser componentes esenciales en los programas de preparación deportiva.

En definitiva, el deporte no es solo una manifestación física, sino un espacio en el que la mente desempeña un rol protagónico. Cada acción deportiva es consecuencia de un complejo proceso cognitivo que integra información, emoción y experiencia. El verdadero potencial del deportista se alcanza cuando armoniza su cuerpo con su mente. La atención permite seleccionar lo importante, la percepción otorga significado a la realidad, y la toma de decisiones transforma ese conocimiento en acción. Cuando estos procesos funcionan de forma integrada, el rendimiento se optimiza y el deportista actúa con mayor seguridad y eficacia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, J., & Cañizares, M. (2021). Un acercamiento a la concentración de la atención en el deporte desde la teoría (Revisión). *Olimpia, 18*(4). http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/429/4292570010/index.html

Almonacid, A., Martinez, M., & Almonacid, M. (2020). Elementos que influyen en el proceso de toma de decisiones en deportes individuales de alto rendimiento: un estudio cualitativo. *Retos, 38*, 341-348.

Cumbicos, M. (2022). Entrenamiento integrado con implicación cognitiva para mejorar la toma de decisiones del fútbol en adolescentes. Revisión sistemática. *Tesis de posgrado*. Universidad de Cuenca, Ecuador.

Dayan, E., & Cohen, L. G. (2011). Neuroplasticity subserving motor skill learning. *Neuron, 72*(3), 443-454. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.008

Díaz-Rodríguez, C., Pérez-Córdoba, E., Cantón, E., & Expósito, V. (2024). Modelo de mejora para la percepción y toma de las decisiones tácticas en el baloncesto. *Retos, 61*, 736-747. https://doi.org/10.47197/retos.v61.105224

Eason, C., Goble, S., Post, E., Huggins, R., Casa, D., & Stearns, R. (2024). Factores que influyen en los servicios de entrenamiento deportivo en las escuelas secundarias de California: una actualización de cinco años. *Journal of Athletic Training, 59*(11), 1132-1138. https://doi.org/10.4085/1062-6050-0187.24

García-Martínez, S., Martínez-Gamuz, S., Ferriz-Valero, A., & Baena-Morales, S. (2022). Toma de decisiones en los deportes colectivos en Educación Física. *Transformar, 3*(1). https://revistatransformar.cl/index.php/transformar/article/view/50

Gómez, E., & Ortiz, J. (2025). Habilidades cognitivas y rendimiento deportivo: una revisión sistemática. *Revista de Psicología del Deporte, 34*(1), 45-62.

Janssen, T., Muller, D., & Mann, D. L. (2025). De la toma de decisiones natural a la representativa en el deporte: un marco para la toma de decisiones en entornos virtuales y aumentados. *Sports Medicine, 53*(10), 1851-1864. https://doi.org/10.1007/s40279-023-01884-3

Magno, J., Cechella, M., Souto, G., Aparecida, L., & Iop, L. (2025). Toma de decisiones y decisión motora en balonmano: relaciones de aproximación y distanciamiento con la praxeología motora. *Retos, 69*. https://doi.org/10.47197/retos.v69.107188

Mann, D. T. Y., Williams, A. M., Ward, P., & Janelle, C. M. (2007). Perceptual-cognitive expertise in sport: A meta-analysis. *Journal of Sport and Exercise Psychology, 29*(4), 457-478. https://doi.org/10.1123/jsep.29.4.457

Mohanty, A., Freeman, J., & Jin, J. (2025). Influencias descendentes en la percepción de estímulos emocionales. *Nature Reviews Psychology, 4*, 388-403. https://doi.org/10.1038/s44159-025-00446-w

Morán, A. (2016). *Sport and exercise psychology: A critical introduction* (2nd ed.). Routledge.

Özen, D., Bayar, K., Özcan, S., & Bana, B. (2024). Funciones cognitivas y su relación con el equilibrio y la agilidad en atletas de diferentes ramas deportivas. *Pensar en Movimiento: Revista de Ciencias del Ejercicio y la Salud, 22*(2), 1-20. https://doi.org/10.15517/pensarmov.v22i2.62707

Perrey, S. (2022). Monitoreo del entrenamiento en el deporte: es hora de asumir la demanda cognitiva. *Sports, 10*(4). https://doi.org/10.3390/sports10040056

Pina, M. (2021). Práctica deportiva: Influencia en el desarrollo cognitivo de los escolares. *Tesis de grado*. Universidad de Zaragoza. https://zaguan.unizar.es/record/100965/files/TAZ-TFG-2021-086.pdf

Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience, 13*, 25-42. https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325

Prieto, J., & Ramirez, A. (2021). Percepción de jugadores de fútbol jóvenes sobre el entorno deportivo. *Retos, 39*. https://doi.org/10.47197/retos.v0i39.77014

Quezada-Vargas, R., & Torres, Z. (2025). Percepción de los servicios deportivos y disfrute por la práctica deportiva en jugadores de fútbol. *Pacha. Revista de Estudios Contemporáneos del Sur Global, 6*(18). https://doi.org/10.46652/pacha.v6i18.408

Raab, M., & Johnson, J. G. (2007). Expertise-based differences in search and option generation strategies. *Journal of Experimental Psychology: Applied, 13*(3), 158-170. https://doi.org/10.1037/1076-898X.13.3.158

Sabarit, A., Rodriguez, E., Morillo, J., Vázquez, J., Hernandez, A., & Morales, V. (2023). Funcionamiento cognitivo y rendimiento deportivo en jóvenes futbolistas. *Cuadernos de Psicología del Deporte, 22*(2), 99-114. https://scielo.isciii.es/pdf/cpd/v22n2/1578-8423-cpd-22-2-99.pdf

Stanton, T., & Spence, C. (2020). La influencia de las señales auditivas en la percepción corporal y del movimiento. *Frontiers in Psychology, 10*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.03001

Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. En D. J. Ingle, M. A. Goodale, & R. J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behavior* (pp. 549-586). MIT Press.

Vaca, R. (2025). Práctica deportiva en las habilidades cognitivas y socioemocionales de los estudiantes y su relación con el rendimiento académico. *Tesis de maestría*. Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador.

Vickers, J. N. (2007). *Perception, cognition, and decision training: The quiet eye in action*. Human Kinetics.

Williams, A. M., & Ward, P. (2007). Anticipation and decision making: exploring new horizons. En G. Tenenbaum & R. C. Eklund (Eds.), *Handbook of sport psychology* (3rd ed., pp. 203-223). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118270011.ch9

Yadav, A. (2023). Atención: Un enfoque cognitivo en la Psicología del Deporte. *IJRASET, 11*. https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.52465

CAPITULO 6: MEMORIA, APRENDIZAJE Y CONSOLIDACIÓN DE HABILIDADES MOTORAS: AUTORA: Lcda. Mónica Patricia Acurio Acurio, Msc.

MEMORIA, APRENDIZAJE Y CONSOLIDACIÓN DE HABILIDADES MOTORAS

MEMORY, LEARNING, AND CONSOLIDATION OF MOTOR SKILLS

AUTOR: Lcda. Mónica Patricia Acurio Acurio, Msc.

CORREO: macurio@utb.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0596-4488

Resumen

El aprendizaje motor, la memoria y la consolidación de habilidades constituyen procesos interconectados que fundamentan la adquisición y el perfeccionamiento del movimiento humano. Este capítulo revisa la evidencia actual sobre los mecanismos neurobiológicos que subyacen al aprendizaje de habilidades motoras, los tipos de memoria implicados (especialmente la memoria procedimental), las fases del aprendizaje (cognitiva, asociativa y autónoma), y los procesos de consolidación sináptica y sistémica. Se analizan los factores que influyen en el aprendizaje motor, incluyendo la práctica, la retroalimentación, el sueño, las emociones y la motivación. Además, se discute el papel de la neuroplasticidad en la adquisición de habilidades y se derivan aplicaciones prácticas para entrenadores, educadores físicos y profesionales de la neurorrehabilitación. Finalmente, se presentan las limitaciones de la investigación actual y futuras líneas de estudio.

Palabras clave: aprendizaje motor, memoria procedimental, consolidación, neuroplasticidad, práctica, retroalimentación, sueño.

Abstract

Motor learning, memory, and skill consolidation are interconnected processes that underpin the acquisition and refinement of human movement. This chapter reviews current evidence on the neurobiological mechanisms underlying motor skill learning, the types of memory involved (especially procedural memory), the phases of learning (cognitive, associative, and autonomic), and the processes of synaptic and systemic consolidation. Factors influencing motor learning are analyzed, including practice, feedback, sleep, emotions, and motivation. Furthermore, the role of neuroplasticity in skill acquisition is discussed, and practical applications for coaches,

physical education teachers, and neurorehabilitation professionals are derived. Finally, the limitations of current research and future avenues for study are presented.

Keywords: motor learning, procedural memory, consolidation, neuroplasticity, practice, feedback, sleep.

6.1. INTRODUCCIÓN

La memoria, el aprendizaje y la consolidación de habilidades motoras son procesos fundamentales para el desarrollo humano, la adquisición y el perfeccionamiento del movimiento. Desde tareas cotidianas como caminar o escribir hasta acciones motoras complejas en el deporte, la danza o la rehabilitación física, el cerebro y el sistema nervioso desempeñan un papel crucial en la organización, ejecución y mejora de los movimientos. Estos procesos permiten no solo aprender una acción motora, sino también retenerla y ejecutarla con creciente precisión y automatización (Schmidt & Lee, 2019).

El aprendizaje motor se define como un conjunto de procesos asociados con la práctica o la experiencia que conducen a cambios relativamente permanentes en la capacidad para producir acciones hábiles (Schmidt & Lee, 2019). Este aprendizaje está íntimamente ligado a la memoria, ya que las habilidades motoras se almacenan y recuperan cuando son necesarias, especialmente a través de la memoria procedimental (Squire & Dede, 2015). La interacción entre memoria y aprendizaje permite que los movimientos sean más precisos, coordinados y adaptables a diferentes situaciones.

La consolidación de las habilidades motoras es el proceso mediante el cual los aprendizajes recién adquiridos se estabilizan y fortalecen en el sistema nervioso central (Dudai, 2004). Esta fase transforma una ejecución inicialmente inestable en una habilidad duradera y progresivamente automatizada. La repetición, la calidad de la práctica, el descanso y el sueño influyen directamente en la consolidación de la memoria motora, permitiendo la reorganización y el fortalecimiento de las conexiones neuronales implicadas en el movimiento (Walker & Stickgold, 2006).

El estudio de la memoria, el aprendizaje y la consolidación de habilidades motoras es de gran relevancia en la educación física, el deporte, la neurorrehabilitación y la psicología del aprendizaje. Comprender estos procesos permite diseñar estrategias más efectivas de enseñanza

y entrenamiento, favoreciendo el desarrollo motor, la prevención de lesiones y la mejora del rendimiento (Krakauer & Mazzoni, 2011).

El objetivo principal de este capítulo es analizar los mecanismos neurobiológicos del aprendizaje y la consolidación de habilidades motoras. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir los tipos de memoria implicados en las habilidades motoras, con especial énfasis en la memoria procedimental; (2) explicar las fases del aprendizaje motor y sus mecanismos subyacentes; (3) analizar el papel de la neuroplasticidad en la adquisición de habilidades; (4) evaluar la influencia de la práctica, la retroalimentación, el sueño y los factores emocionales en el aprendizaje motor; (5) discutir la transferencia del aprendizaje a nuevas situaciones; y (6) derivar aplicaciones prácticas para entrenadores, educadores y rehabilitadores.

6.2. DESARROLLO

6.2.1. Fundamentos neurobiológicos del aprendizaje motor.

6.2.1.1. El sistema nervioso y el control motor.

El aprendizaje motor depende de la integridad y plasticidad de múltiples estructuras del sistema nervioso central y periférico. La corteza motora (área 4 de Brodmann) y la corteza premotora (área 6) son responsables de la planificación y ejecución de los movimientos voluntarios. Los ganglios basales (núcleo caudado, putamen, globo pálido) participan en la selección y automatización de secuencias motoras, mientras que el cerebelo contribuye a la coordinación, el aprendizaje de precisión y la adaptación sensoriomotora (Doyon & Benali, 2005).

Durante el aprendizaje de una nueva habilidad motora, se produce una reorganización funcional y estructural de estas regiones. La práctica repetida induce cambios en la fuerza de las conexiones sinápticas (fenómeno conocido como potenciación a largo plazo (LTP) y depresión a largo plazo (LTD)), que constituyen la base celular de la memoria motora (Dayan & Cohen, 2011).

6.2.2. Neuroplasticidad y aprendizaje motor.

La neuroplasticidad es la capacidad del sistema nervioso para modificar su estructura y función en respuesta a la experiencia, el aprendizaje o las lesiones (Pascual-Leone et al., 2005). En el contexto del aprendizaje motor, la neuroplasticidad se manifiesta a través de:

Por un lado, la plasticidad sináptica, que no es más que cambios en la eficacia de las sinapsis entre neuronas, mediados por mecanismos como la LTP y la LTD (Malenka & Bear, 2004).

La plasticidad estructural, la cual se enmarca en la formación de nuevas espinas dendríticas, aumento de la densidad sináptica y cambios en la arborización dendrítica (Xu et al., 2009).

Y la plasticidad de mapa cortical, que se encarga de la reorganización de las representaciones motoras en la corteza, con expansión de las áreas implicadas en la habilidad entrenada (Nudo, 2013).

La neuroplasticidad es más notable durante la infancia, pero persiste en la edad adulta, aunque con menor intensidad. El entrenamiento físico y cognitivo puede potenciar la plasticidad, y el ejercicio aeróbico ha mostrado incrementar los niveles de factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF) , que facilita la plasticidad sináptica y la neurogénesis (Erickson et al., 2011).

6.2.3. Tipos de memoria implicados en las habilidades motoras.

La memoria no es un sistema unitario, sino que comprende múltiples tipos y subsistemas que interactúan entre sí. El modelo de Atkinson y Shiffrin (1968) distingue tres almacenes principales: memoria sensorial, memoria a corto plazo y memoria a largo plazo. Dentro de la memoria a largo plazo, se diferencian la memoria declarativa (explícita) y la memoria no declarativa (implícita) (Squire & Dede, 2015).

6.2.3.1. Memoria declarativa (explícita).

La memoria declarativa almacena conocimientos que pueden ser evocados conscientemente. Se divide en:

- Memoria semántica, que son los conocimientos generales sobre el mundo (ej. las reglas del fútbol).
- Memoria episódica, que guarda los recuerdos de experiencias personales (ej. el primer gol marcado en un partido).

El sustrato neural de la memoria declarativa incluye el hipocampo, la corteza entorrinal y las áreas corticales de asociación (Squire & Dede, 2015).

6.2.3.2. Memoria no declarativa (implícita).

La memoria no declarativa incluye habilidades y hábitos que se adquieren y utilizan sin conciencia. Dentro de esta categoría se encuentra la memoria procedimental, que es la más relevante para las habilidades motoras.

6.2.3.3. Memoria procedimental.

La memoria procedimental (o instrumental) almacena "cómo se hacen las cosas": habilidades motoras, destrezas cognitivas y hábitos (Silván, 2022). Permite ejecutar acciones como escribir,

conducir, tocar un instrumento o atarse los cordones de forma automática y sin esfuerzo consciente (Squire & Dede, 2015).

6.2.4. El sustrato neural de la memoria procedimental incluye:

El Estriado (núcleo caudado y putamen): Implicado en la adquisición de hábitos y secuencias motoras.

Los Ganglios basales: Participan en la selección y automatización de acciones.

La Corteza premotora: Involucrada en la planificación de secuencias motoras.

El Cerebelo: Esencial para la coordinación, el aprendizaje de precisión y la adaptación a errores (Doyon & Benali, 2005).

El desarrollo de la memoria procedimental ocurre principalmente durante la infancia, pero continúa modificándose con la experiencia y la práctica en la edad adulta (Dayan & Cohen, 2011).

Tabla 1.

Tipos de memoria implicados en el aprendizaje motor

Tipo de memoria	Definición	Duración	Capacidad	Sustrato neural	Ejemplo en deporte
Memoria sensorial	Retención breve de estímulos sensoriales	Milisegundos - segundos	Muy limitada	Cortezas sensoriales primarias	Un futbolista percibe la trayectoria del balón
Memoria a corto plazo (MCP)	Retención temporal de información	Segundos - minutos	Limitada	Corteza prefrontal, lóbulo parietal	Un jugador recuerda la jugada táctica durante unos segundos
Memoria de trabajo	Manipulación activa de información	Segundos - minutos	Limitada	Corteza prefrontal dorsolateral	Un base de baloncesto procesa la posición de los rivales mientras dribla
Memoria declarativa (explícita)	Conocimientos recuperables conscientemente	Permanente	Ilimitada	Hipocampo, cortezas de asociación	Un tenista recuerda las reglas del juego y sus experiencias previas
Memoria semántica	Conocimientos generales del mundo	Permanente	Ilimitada	Corteza temporal, lóbulo parietal	El conocimiento de las reglas del fútbol

Tipo de memoria	Definición	Duración	Capacidad	Sustrato neural	Ejemplo en deporte
Memoria episódica	Recuerdos de experiencias personales	Permanente	Ilimitada	Hipocampo, corteza prefrontal	Un deportista recuerda su mejor actuación en una final
Memoria procedimental (implícita)	Habilidades y hábitos (cómo hacer)	Permanente	Ilimitada	Estriado, ganglios basales, cerebelo, corteza motora	Un futbolista controla el balón sin pensar

6.2.5. Fases del aprendizaje motor.

El aprendizaje motor progresa a través de tres fases principales, descritas inicialmente por Fitts y Posner (1967): cognitiva, asociativa y autónoma. Cada fase se caracteriza por diferentes demandas atencionales, niveles de rendimiento y mecanismos neurales (Schmidt & Lee, 2019).

6.2.5.1. Fase cognitiva.

En esta fase inicial, el aprendiz debe comprender la tarea, identificar los movimientos requeridos y desarrollar una estrategia para ejecutarlos. Características principales:

- Alta demanda atencional: El aprendiz debe pensar conscientemente en cada paso del movimiento.
- Errores frecuentes y variables: La ejecución es inconsistente y poco coordinada.
- Uso intensivo de la memoria de trabajo: Se requieren instrucciones verbales y retroalimentación explícita.

Activación de la corteza prefrontal y la corteza premotora.

En el deporte, un jugador que aprende un nuevo golpe técnico (ej. un revés en tenis) pasa por esta fase, cometiendo errores y necesitando instrucciones detalladas del entrenador.

6.2.5.2. Fase asociativa.

En esta fase intermedia, el aprendiz comienza a refinar el movimiento y a reducir los errores. Características principales:

- Menor demanda atencional: El aprendiz puede prestar atención a otros aspectos del entorno.
- Mayor consistencia: Los movimientos se vuelven más precisos y coordinados.

- Integración de la retroalimentación: El aprendiz utiliza la retroalimentación para corregir errores.

Activación de los ganglios basales y el cerebelo.

Un tenista en la fase asociativa comienza a ejecutar el revés con mayor fluidez y puede ajustarlo según la velocidad y el efecto de la pelota.

6.2.5.3. Fase autónoma.

En esta fase avanzada, el movimiento se ejecuta de forma automática, con mínima intervención consciente. Características principales:

- Baja demanda atencional: La habilidad se ejecuta sin esfuerzo cognitivo aparente.
- Alta consistencia y precisión: El movimiento es estable y eficiente.
- Automatización: El aprendiz puede realizar la tarea mientras atiende a otros estímulos (ej. hablar mientras conduce).

Activación predominante del cerebelo y los ganglios basales, con reducción de la activación prefrontal.

Un tenista de élite ejecuta el revés de forma automática, permitiéndole concentrarse en la táctica y la estrategia del partido.

6.2.6. Mecanismos de percepción, decisión y ejecución en el aprendizaje motor.

Durante el aprendizaje motor, tres mecanismos interactúan para producir la acción adecuada: la percepción, la decisión y la ejecución (Schmidt & Lee, 2019).

Mecanismo de percepción

El mecanismo de percepción procesa la información del entorno (posición del balón, rivales, compañeros) y del propio cuerpo (propiocepción, Interocepción). Esta información es esencial para guiar la acción. En habilidades abiertas (entornos cambiantes, ej. deportes de equipo), la percepción debe ser rápida y flexible. En habilidades cerradas (entornos estables, ej. lanzamiento de peso), la percepción es menos variable.

Mecanismo de decisión

El mecanismo de decisión selecciona la respuesta motora más adecuada entre las posibles opciones, basándose en la información percibida y el conocimiento previo. La velocidad de decisión depende del repertorio de respuestas disponibles y de la experiencia del aprendiz. En

habilidades abiertas, este mecanismo es crucial debido a la gran variabilidad de situaciones (Williams & Ward, 2007).

Mecanismo de ejecución

El mecanismo de ejecución activa el plan motor seleccionado, controlando la contracción muscular, la velocidad y la fuerza. Una vez ejecutado, el sistema recibe retroalimentación sobre el resultado, que permite ajustes en tiempo real (control online) y mejoras en ensayos posteriores (control offline) (Krakauer & Mazzoni, 2011).

6.2.7. Papel del sistema nervioso central en el aprendizaje motor.

En cuanto al papel del aprendizaje motor no depende de un único proceso, sino de múltiples mecanismos que pueden trabajar en paralelo o de forma secuencial. Según la literatura actual, se distinguen cuatro mecanismos principales (Krakauer & Mazzoni, 2011):

1. Aprendizaje dependiente del uso: Cambios en el comportamiento motor impulsados por la práctica repetida de una tarea. Cuanto más se repite un movimiento, más consistente se vuelve. Los cambios se deben a la plasticidad sináptica en las áreas motoras (Dayan & Cohen, 2011).

2. Aprendizaje instructivo: Se basa en instrucciones verbales o demostraciones que guían al aprendiz sobre cómo ejecutar la tarea. Implica la activación de la memoria de trabajo y la corteza prefrontal (Schmidt & Lee, 2019).

3. Aprendizaje por refuerzo: El aprendizaje se produce mediante la recompensa o el castigo. La dopamina juega un papel central en este proceso, modulando la plasticidad en el estriado (Dayan & Cohen, 2011).

4. Adaptación sensoriomotora: Ajustes en los movimientos en respuesta a cambios en las condiciones sensoriales (ej. usar un peso más pesado). Este mecanismo implica principalmente al cerebelo (Krakauer & Mazzoni, 2011).

6.2.8. Consolidación de la memoria motora.

La consolidación es el proceso mediante el cual los recuerdos recién codificados se transforman en una forma estable y duradera de almacenamiento (Dudai, 2004). La consolidación se divide en dos fases principales:

Consolidación sináptica

La consolidación sináptica ocurre en las primeras horas tras el aprendizaje e implica cambios en la fuerza de las conexiones sinápticas. La potenciación a largo plazo (LTP) es el mecanismo celular más estudiado, que fortalece las sinapsis entre neuronas que se activan simultáneamente (Malenka & Bear, 2004). Este proceso depende de la síntesis de nuevas proteínas y la activación de vías de señalización (ej. CREB, BDNF).

Consolidación sistémica

La consolidación sistémica ocurre a lo largo de semanas, meses o años e implica la reorganización de los recuerdos en el cerebro. Los recuerdos recién adquiridos dependen del hipocampo, pero con el tiempo se transfieren a las áreas corticales para su almacenamiento permanente (Dudai, 2004). Este proceso explica la amnesia retrógrada con gradiente temporal: los recuerdos recientes son más vulnerables a las lesiones del hipocampo que los recuerdos antiguos (Squire & Dede, 2015).

6.2.9. Los factores que influyen en la consolidación incluyen:

- Práctica repetida: Fortalece las conexiones sinápticas y promueve la estabilización de la memoria.
- Sueño: El sueño, especialmente el sueño de ondas lentas y el sueño REM, favorece la consolidación de la memoria motora (Walker & Stickgold, 2006).
- Descanso: Los períodos de descanso entre sesiones de práctica (práctica distribuida) mejoran la consolidación en comparación con la práctica masiva (Schmidt & Lee, 2019).

6.2.10. Factores que influyen en el aprendizaje motor.
Práctica y repetición

La práctica es el factor más importante para el aprendizaje motor. La práctica repetida induce cambios en la fuerza de las conexiones sinápticas y en la representación cortical de la habilidad (Nudo, 2013). La práctica distribuida (con descansos) es más efectiva que la práctica masiva para la consolidación a largo plazo (Schmidt & Lee, 2019).

La retroalimentación

- La retroalimentación es la información sobre el resultado de la acción y permite corregir errores y refinar la ejecución (Schmidt & Lee, 2019). Se distinguen dos tipos:
- Feedback intrínseco: Proviene de las sensaciones propioceptivas, visuales y auditivas del propio movimiento.

- Feedback extrínseco: Proviene de fuentes externas, como el entrenador (ej. "El brazo debe estar más extendido").
- La retroalimentación es más efectiva cuando es:
- Inmediata: Se proporciona poco después de la acción.
- Específica: Se centra en aspectos concretos del movimiento.
- Constructiva: Se enfoca en cómo mejorar, no solo en el error.

Sueño y descanso

El sueño juega un papel crucial en la consolidación de la memoria motora. Durante el sueño de ondas lentas y el sueño REM, se producen procesos de reactivación y reorganización de las redes neuronales que fortalecen la memoria (Walker & Stickgold, 2006). La privación de sueño deteriora el aprendizaje y la consolidación, aumentando el riesgo de lesiones y reduciendo el rendimiento (Tobajas, 2024).

Motivación y emociones, La motivación y el estado emocional influyen significativamente en el aprendizaje motor. El sistema dopaminérgico, que procesa la recompensa y la motivación, modula la plasticidad en el estriado y facilita la consolidación de la memoria (Dayan & Cohen, 2011). Un estado emocional positivo promueve la liberación de dopamina y mejora el aprendizaje, mientras que la ansiedad y el estrés pueden deteriorarlo (Alvarez & Suazo, 2025).

Edad y nivel de entrenamiento; La capacidad de aprendizaje motor varía con la edad. La infancia es un período de máxima plasticidad, lo que permite una adquisición más rápida de habilidades motoras. En la edad adulta, aunque la plasticidad declina, el aprendizaje sigue siendo posible con la práctica adecuada (Pascual-Leone et al., 2005). Además, el nivel de entrenamiento previo influye: los deportistas entrenados pueden aprender nuevas habilidades más rápidamente debido a una mayor experiencia motora y a una red neural más refinada (Schmidt & Lee, 2019).

6.2.11. Transferencia del aprendizaje motor.

La transferencia del aprendizaje motor se refiere a la aplicación de una habilidad aprendida en un contexto a una nueva situación o tarea (Schmidt & Lee, 2019). Se distinguen varios tipos:

Transferencia positiva: El aprendizaje previo facilita el aprendizaje de una nueva habilidad (ej. un guitarrista aprende el ukelele más rápidamente).

Transferencia negativa: El aprendizaje previo interfiere con el aprendizaje de una nueva habilidad (ej. cambiar la técnica de saque en tenis puede ser difícil para un jugador con una técnica consolidada).

Transferencia lateral: La aplicación de habilidades en contextos diferentes pero relacionados (ej. un futbolista aplica su habilidad de pase en el fútbol sala).

Transferencia vertical: La aplicación de conocimientos avanzados a áreas básicas (ej. un estudiante de medicina aplica su conocimiento de fisiología al estudio de la farmacología).

En el deporte, la transferencia positiva es un objetivo clave en el entrenamiento. Diseñar tareas que compartan elementos estructurales con la competición (ej. juegos reducidos) facilita la transferencia del aprendizaje a situaciones reales (Williams & Ward, 2007).

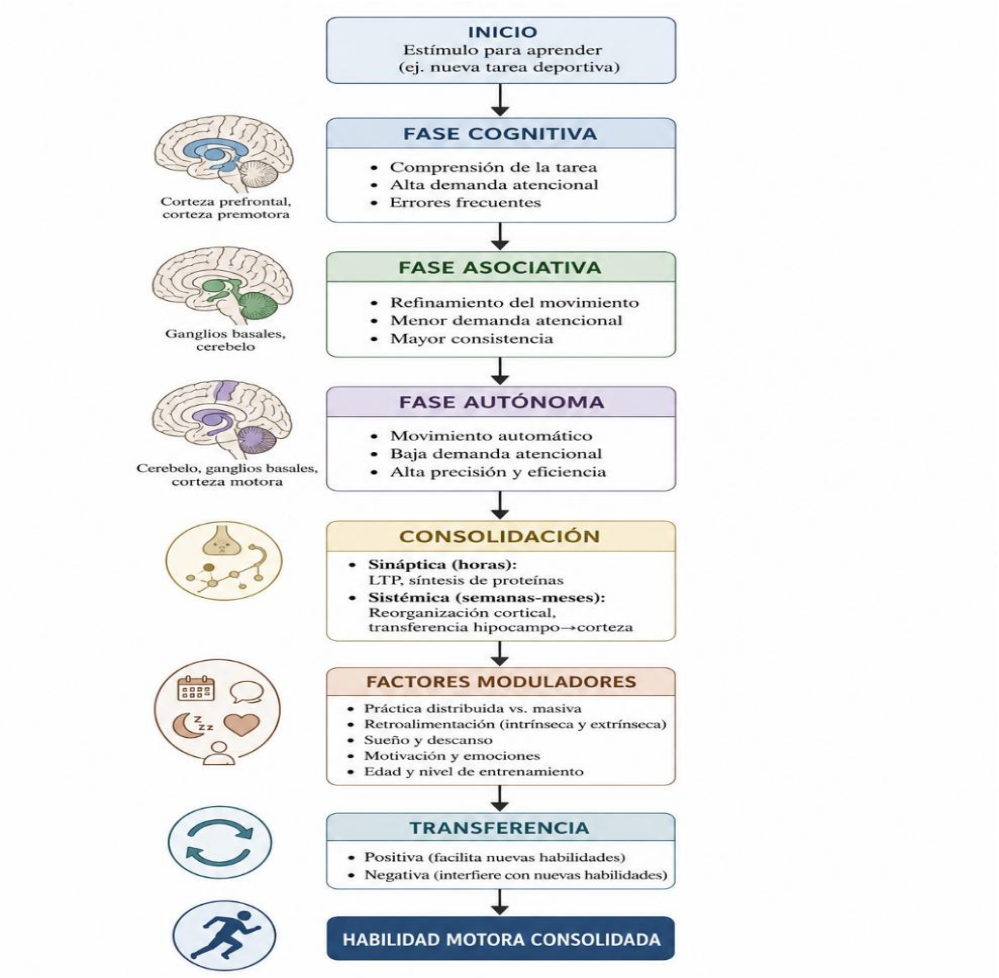
El Desarrollo motor: de la variación a la adaptación

El desarrollo motor durante la infancia implica la transición de movimientos variables e inestables a acciones controladas y adaptables (García, 2022). Este proceso está mediado por la maduración del sistema nervioso y la interacción con el entorno. Los Patrones Generadores Centrales (CPGs) , redes neuronales en la médula espinal y el tronco encefálico, son responsables de los movimientos rítmicos como caminar, respirar o succionar, y pueden operar sin entrada sensorial (Goulding, 2009). Sin embargo, en condiciones normales, los CPGs son modulados por información aferente y por circuitos cortico-subcorticales, lo que permite la adaptación a las demandas del entorno.

A pesar de los avances en la descripción del desarrollo motor, los mecanismos neurales que subyacen a esta transición aún no se comprenden completamente (García, 2022). Futuras investigaciones deberán explorar cómo la interacción entre la maduración cortical, la mielinización y la plasticidad sináptica permite la adquisición de habilidades motoras complejas.

Figura 1.

Diagrama de flujo del aprendizaje motor y la consolidación



6.2.12. Teorías y modelos de aprendizaje y control motor en neurorrehabilitación.

La neurorrehabilitación se centra en recuperar funciones motoras perdidas o dañadas tras lesiones cerebrales (accidentes cerebrovasculares, traumatismos, enfermedades neurodegenerativas). Las teorías del control motor guían los tratamientos terapéuticos (Zapata, 2021).

Modelos teóricos

Modelo jerárquico: El sistema nervioso controla el movimiento de forma jerárquica (corteza → tronco encefálico → médula espinal). La rehabilitación busca reactivar los centros superiores.

Modelo de sistemas: El movimiento emerge de la interacción de múltiples sistemas (neural, musculoesquelético, sensorial, cognitivo). La rehabilitación se centra en la interacción entre sistemas.

Modelo ecológico: El movimiento se adapta al entorno. La rehabilitación utiliza tareas funcionales en contextos reales.

6.2.13. Aplicaciones en neurorrehabilitación.

El aprendizaje motor es el fundamento de la neurorrehabilitación. Los principios del aprendizaje motor (práctica repetida, feedback, práctica distribuida, transferencia) se aplican para recuperar la función motora en pacientes con lesiones cerebrales (Zapata, 2021). Ejemplos:

Terapia de restricción del lado sano: Forzar el uso del miembro afectado para promover la plasticidad.

Entrenamiento con realidad virtual: Proporcionar entornos simulados para la práctica de movimientos.

Feedback aumentado: Proporcionar información adicional sobre el movimiento para mejorar el aprendizaje.

6.2.14. Aplicaciones prácticas para entrenadores, educadores y rehabilitadores.

A partir de la evidencia revisada, se proponen las siguientes recomendaciones prácticas:

1. Diseñar sesiones de práctica distribuidas en lugar de masivas. La práctica distribuida (con intervalos de descanso) mejora la consolidación de la memoria motora en comparación con la práctica masiva. Por ejemplo, realizar 3 sesiones de 20 minutos en lugar de una sesión de 60 minutos (Schmidt & Lee, 2019).
2. Proporcionar retroalimentación específica e inmediata. La retroalimentación debe centrarse en aspectos concretos del movimiento y ofrecerse poco después de la acción. Evitar el feedback excesivo que pueda sobrecargar la memoria de trabajo (Schmidt & Lee, 2019).
3. Fomentar el sueño reparador. El sueño es esencial para la consolidación. Evitar entrenamientos nocturnos intensos que puedan interferir con la calidad del sueño y recomendar a los deportistas una higiene del sueño adecuada (Walker & Stickgold, 2006).

4. Utilizar la variabilidad de la práctica. La práctica variable (diferentes contextos, velocidades, superficies) mejora la transferencia del aprendizaje a situaciones nuevas, en comparación con la práctica constante (Schmidt & Lee, 2019).

5. Incorporar la motivación y el refuerzo positivo. La motivación intrínseca y el refuerzo positivo aumentan la liberación de dopamina y facilitan el aprendizaje. Utilizar juegos, retos y objetivos personales para mantener la motivación (Dayan & Cohen, 2011).

6. Evaluar el nivel de desarrollo y la capacidad individual. Adaptar las tareas de aprendizaje al nivel de desarrollo del deportista o paciente. En niños, aprovechar la alta plasticidad; en adultos, enfatizar la práctica deliberada y la retroalimentación precisa (Schmidt & Lee, 2019).

7. En neurorrehabilitación, aplicar los principios del aprendizaje motor: práctica repetida, transferencia gradual, retroalimentación aumentada y tareas funcionales significativas (Zapata, 2021).

Estas estrategias tienen un nivel de evidencia A (basado en múltiples estudios experimentales y revisiones sistemáticas) y un nivel de recomendación fuerte.

6.2.15. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras.

- A pesar del gran avance en la comprensión del aprendizaje y la consolidación motora, existen limitaciones importantes:
- La mayoría de los estudios se han realizado en condiciones de laboratorio, con tareas simples que no reflejan la complejidad de los deportes o las actividades de la vida diaria. Se necesitan estudios ecológicamente válidos (Krakauer & Mazzoni, 2011).
- La interacción entre los diferentes mecanismos de aprendizaje (dependiente del uso, instructivo, por refuerzo, adaptación) aún no se comprende completamente. Futuras investigaciones deberían explorar cómo operan en conjunto.
- El papel de la neuroplasticidad en el aprendizaje motor en adultos mayores no está completamente dilucidado. Se requieren estudios longitudinales para evaluar la eficacia de las intervenciones.
- La influencia de los factores emocionales y motivacionales en el aprendizaje motor necesita más investigación, especialmente en contextos de competición de alto estrés.
- Las técnicas de neuroimagen (fMRI, fNIRS) aplicadas al aprendizaje motor en el deporte aún son limitadas. Futuras investigaciones deberían utilizar estas herramientas

para estudiar la actividad cerebral durante el aprendizaje en tiempo real (Dayan & Cohen, 2011).

6.3. CONCLUSIONES

La memoria, el aprendizaje y la consolidación de habilidades motoras constituyen procesos interconectados que fundamentan la adquisición y el refinamiento del movimiento humano. El sistema nervioso, mediante el aprendizaje motor, se adapta a nuevas exigencias produciendo modificaciones funcionales y estructurales que permiten ejecutar acciones con mayor precisión, coordinación y eficacia. La memoria procedimental, mediada por el estriado, los ganglios basales, la corteza premotora y el cerebelo, es el almacén principal de las habilidades motoras, permitiendo su ejecución automática y sin esfuerzo consciente.

La consolidación de las habilidades motoras es una fase crítica dentro de este proceso, que asegura la estabilidad y permanencia del aprendizaje en el tiempo. La consolidación sináptica (LTP) y la consolidación sistémica (transferencia hipocampo-corteza) transforman los aprendizajes recién adquiridos en memorias duraderas. El sueño, el descanso, la práctica distribuida y la retroalimentación efectiva juegan un papel vital en este proceso, favoreciendo la reorganización neuronal y el fortalecimiento de las redes cerebrales implicadas en el control motor.

Además, la neuroplasticidad (especialmente en la infancia, pero también en la edad adulta), permite que el cerebro se reorganice en respuesta a la práctica y la experiencia. Los factores emocionales y motivacionales, mediados por el sistema dopaminérgico, modulan la plasticidad y facilitan el aprendizaje.

Comprender la relación entre memoria, aprendizaje motor y consolidación permite optimizar las estrategias de enseñanza, entrenamiento y rehabilitación. En la educación y el deporte, este conocimiento permite diseñar programas que promuevan un aprendizaje más significativo y duradero, adaptado al nivel de desarrollo individual. En la neurorrehabilitación, la aplicación de los principios del aprendizaje motor facilita la recuperación de funciones motoras dañadas por lesiones o enfermedades cerebrales.

En definitiva, el estudio de la memoria, el aprendizaje y la consolidación de habilidades motoras es fundamental para comprender cómo el ser humano aprende, retiene y mejora sus movimientos. La integración de estos conocimientos en la educación física, el deporte y la rehabilitación permite mejorar el desarrollo motor, el rendimiento y la calidad de vida de las personas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarez, M. J., & Suazo, S. C. (2025). Motivación, emoción y atención: factores clave en el éxito del aprendizaje escolar. *Revista Avante Educativo*, 9(1), 45-62. https://revista-avante.com/index.php/educativo/article/view/152/109

Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. En K. W. Spence & J. T. Spence (Eds.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 2, pp. 89-195). Academic Press. https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60422-3

Dayan, E., & Cohen, L. G. (2011). Neuroplasticity subserving motor skill learning. *Neuron*, 72(3), 443-454. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.008

Doyon, J., & Benali, H. (2005). Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Current Opinion in Neurobiology*, 15(2), 161-167. https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.03.004

Dudai, Y. (2004). The neurobiology of consolidations, or, how stable is the engram? *Annual Review of Psychology*, 55, 51-86. https://doi.org/10.1146/annurev.psych.55.090902.142050

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*, 108(7), 3017-3022. https://doi.org/10.1073/pnas.1015950108

Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). *Human performance*. Brooks/Cole.

García, A. M. (2022). Desarrollo motor: ¿cómo pasamos de la variación a la adaptación? *Revista de Neuropediatría*, 15(3), 45-58. https://efisiopediatric.com/desarrollo-motor-como-pasamos-de-la-variacion-a-la-adaptacion/

Goulding, M. (2009). Circuits controlling vertebrate locomotion: moving in a new direction. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(7), 507-518. https://doi.org/10.1038/nrn2608

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

Malenka, R. C., & Bear, M. F. (2004). LTP and LTD: an embarrassment of riches. *Neuron*, 44(1), 5-21. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.09.012

Nudo, R. J. (2013). Recovery after brain injury: mechanisms and principles. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 887. https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00887

Pascual-Leone, A., Amedi, A., Fregni, F., & Merabet, L. B. (2005). The plastic human brain cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 28, 377-401. https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144216

Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2019). *Motor Learning and Performance: From Principles to Application* (6th ed.). Human Kinetics.

Squire, L. R., & Dede, A. J. O. (2015). Conscious and unconscious memory systems. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 7(3), a021667. https://doi.org/10.1101/cshperspect.a021667

Tobajas, C. E. (2024). El efecto del sueño de calidad en la recuperación física. Cómo el descanso adecuado potencia la rehabilitación y el rendimiento deportivo. *Revista Médica de Ciencias del Deporte*, 12(3), 145-162.

Walker, M. P., & Stickgold, R. (2006). Sleep, memory, and plasticity. *Annual Review of Psychology*, 57, 139-166. https://doi.org/10.1146/annurev.psych.56.091103.070307

Williams, A. M., & Ward, P. (2007). Anticipation and decision making: exploring new horizons. En G. Tenenbaum & R. C. Eklund (Eds.), *Handbook of sport psychology* (3rd ed., pp. 203-223). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118270011.ch9

Xu, T., Yu, X., Perlik, A. J., Tobin, W. F., Zweig, J. A., Tennant, K., ... & Zuo, Y. (2009). Rapid formation and selective stabilization of synapses for enduring motor memories. *Nature*, 462(7275), 915-919. https://doi.org/10.1038/nature08389

Zapata, L. M. (2021). Teorías y modelos sobre el aprendizaje motor y el control motor en neurorehabilitación. *Revista de Neurorehabilitación*, 8(2), 89-106. https://lauramariamejia.com/teorias-y-modelos-sobre-el-aprendizaje-motor-y-el-control-motor-en-neurorehabilitacion/

CAPITULO 7: FUNCIONES EJECUTIVAS Y SU INFLUENCIA EN LA PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN DE ACCIONES DEPORTIVAS: Autor: Juan Miguel Luperón Terry, Ph.D.

FUNCIONES EJECUTIVAS Y SU INFLUENCIA EN LA PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN DE ACCIONES DEPORTIVAS

EXECUTIVE FUNCTIONS AND THEIR INFLUENCE ON THE PLANNING AND EXECUTION OF SPORTS ACTIONS

Autor: Juan Miguel Luperón Terry, Ph.D.

Correo electrónico: jluperon@.utb.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6849-150X

Resumen

Las funciones ejecutivas (FE) son un conjunto de procesos cognitivos de alto nivel que incluyen la memoria de trabajo, el control inhibitorio y la flexibilidad cognitiva, las cuales desempeñan un papel fundamental en la planificación y ejecución de acciones deportivas. Este capítulo revisa la evidencia actual sobre la relación entre las FE y el rendimiento en deportes de equipo e individuales, analiza los mecanismos neurobiológicos subyacentes, incorpora hallazgos recientes sobre plasticidad cerebral y variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), y explora las implicaciones para el entrenamiento cognitivo y la evaluación neuropsicológica de deportistas. Se concluye que el entrenamiento físico, especialmente el aeróbico, y las intervenciones cognitivas específicas pueden mejorar las FE, con efectos positivos en la toma de decisiones bajo presión, la adaptación táctica y la autorregulación emocional. Se proporcionan herramientas prácticas para entrenadores y preparadores físicos, destacando la utilidad de la VFC como biomarcador de control inhibitorio y el uso de baterías neuropsicológicas validadas en el contexto deportivo.

Palabras clave: funciones ejecutivas, deporte, control inhibitorio, flexibilidad cognitiva, memoria de trabajo, rendimiento deportivo, plasticidad cerebral, variabilidad de la frecuencia cardíaca.

Abstrac

Executive functions (EFs) (a set of high-level cognitive processes that include working memory, inhibitory control, and cognitive flexibility)play a fundamental role in the planning and execution of athletic actions. This chapter reviews the current evidence on the relationship between EFs and performance in team and individual sports, analyzes the underlying neurobiological mechanisms, incorporates recent findings on brain plasticity and heart rate variability (HRV), and explores the implications for cognitive training and the

neuropsychological assessment of athletes. It concludes that physical training, especially aerobic training, and targeted cognitive interventions can improve EFs, with positive effects on decision-making under pressure, tactical adaptation, and emotional self-regulation. Practical tools are provided for coaches and trainers, highlighting the usefulness of HRV as a biomarker of inhibitory control and the use of validated neuropsychological batteries in the sports context.

Keywords: executive functions, sport, inhibitory control, cognitive flexibility, working memory, sports performance, brain plasticity, heart rate variability.

7.1. INTRODUCCIÓN

El rendimiento deportivo de élite no depende únicamente de capacidades físicas como la fuerza, la velocidad o la resistencia. En los últimos años, la neurociencia cognitiva ha demostrado que los procesos mentales superiores (denominados funciones ejecutivas (FE)) son predictores significativos del éxito en deportes de equipo y en disciplinas que requieren toma de decisiones rápida y adaptación a entornos cambiantes (Vestberg et al., 2017; Diamond, 2013).

Las FE se definen como un conjunto de habilidades cognitivas que permiten al individuo planificar, inhibir respuestas automáticas, mantener y manipular información relevante en la memoria de trabajo, y cambiar flexiblemente entre estrategias o perspectivas (Miyake et al., 2000; Diamond, 2013). Estas capacidades son esenciales durante la competición deportiva, donde el atleta debe interpretar señales del entorno (posición de compañeros, rivales, balón), anticipar movimientos, resistir distracciones y ejecutar la acción motora más adecuada en milisegundos (Furley & Memmert, 2010).

El objetivo de este capítulo es: (1) describir los componentes principales de las FE y su base neuroanatómica, (2) analizar la evidencia empírica que vincula cada componente con el rendimiento deportivo, (3) evaluar el impacto de la fatiga mental sobre las FE, (4) revisar las intervenciones de entrenamiento cognitivo y físico que mejoran las FE en deportistas, (5) ampliar la discusión sobre plasticidad cerebral inducida por el deporte y el uso de la variabilidad de la frecuencia cardíaca como marcador de control inhibitorio, (6) detallar las herramientas de evaluación neuropsicológica disponibles para el ámbito deportivo, y (7) presentar aplicaciones prácticas para entrenadores y preparadores físicos. Finalmente, se discuten las limitaciones y futuras líneas de investigación.

7.2. DESARROLLO

7.2.1. Fundamentos neurobiológicos de las funciones ejecutivas y plasticidad cerebral inducida por el deporte.

Las FE están mediadas predominantemente por las regiones frontales del cerebro, especialmente la corteza prefrontal dorsolateral (CPFDL), la corteza prefrontal ventromedial y la corteza cingulada anterior. La CPFDL es crucial para la memoria de trabajo y la planificación; la corteza orbitofrontal participa en la inhibición de respuestas y el procesamiento de recompensas; y la corteza cingulada anterior se activa durante el monitoreo de conflictos y la detección de errores (Miller & Cohen, 2001). Además, los ganglios basales y el cerebelo contribuyen a la automatización de secuencias motoras y al aprendizaje procedimental, procesos íntimamente relacionados con la ejecución deportiva (Koziol et al., 2013).

Desde una perspectiva neuroquímica, neurotransmisores como la dopamina y la noradrenalina modulan el funcionamiento ejecutivo. El ejercicio físico agudo incrementa la liberación de dopamina en el estriado y mejora la flexibilidad cognitiva (Winter et al., 2007). Asimismo, el factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF) actúa como mediador de la neurogénesis y la plasticidad sináptica inducidas por el entrenamiento aeróbico (Erickson et al., 2011).

Plasticidad cerebral inducida por el deporte. Numerosos estudios han demostrado que la práctica sistemática de deporte produce cambios estructurales en el cerebro, un fenómeno conocido como plasticidad cerebral inducida por el entrenamiento. Por ejemplo, jugadores de baloncesto profesionales muestran mayor volumen de materia gris en la CPFDL y en los ganglios basales comparados con controles sedentarios (Wei et al., 2018). Además, el entrenamiento de resistencia de larga duración aumenta la densidad de espinas dendríticas en la corteza motora y en el estriado, facilitando el aprendizaje de secuencias motoras complejas (Khodayari et al., 2020). Estos hallazgos indican que el deporte no solo mejora la función ejecutiva de manera transitoria, sino que también remodela las redes neuronales que la sustentan.

7.2.2. Componentes de las funciones ejecutivas y su papel en el deporte.

Siguiendo el modelo influyente de Miyake et al. (2000), las FE se componen de tres procesos centrales: memoria de trabajo, control inhibitorio y flexibilidad cognitiva. A continuación se analiza cada uno en el contexto deportivo.

7.2.2.1. Memoria de trabajo.

La memoria de trabajo (MT) es la capacidad de retener y manipular información temporalmente mientras se realiza otra tarea (Baddeley, 2003). En el deporte, la MT permite al jugador recordar instrucciones tácticas, mantener la posición de los rivales durante una jugada y actualizar constantemente la información relevante (por ejemplo, el marcador, el tiempo restante, las tarjetas acumuladas). Un estudio con futbolistas de élite encontró que aquellos con mayor capacidad de MT cometían menos errores en tareas de pase bajo presión defensiva (Furley & Memmert, 2010).

7.2.2.2. Control inhibitorio y su relación con la variabilidad de la frecuencia cardíaca.

El control inhibitorio es la habilidad para suprimir respuestas automáticas, impulsos o distracciones que interfieren con la meta actual (Diamond, 2013). En deportes como el baloncesto o el fútbol, un delantero debe inhibir la tentación de tirar a portería cuando un compañero está mejor posicionado. En tenis, el jugador debe inhibir la respuesta de golpear la pelota inmediatamente para esperar un bote más favorable. Los niveles más altos de control inhibitorio se asocian con menor número de tarjetas rojas en fútbol (Verburgh et al., 2014) y con mejor rendimiento en deportes de oposición.

Variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) como marcador de control inhibitorio. Recientemente se ha propuesto la VFC en reposo y durante la tarea como un biomarcador no invasivo de la integridad del control inhibitorio. La VFC de alta frecuencia (HF-VFC, 0.15-0.40 Hz) refleja la actividad parasimpática y se correlaciona positivamente con el rendimiento en tareas de inhibición (Stroop, go/no-go) en deportistas. Un estudio con tenistas profesionales mostró que una mayor VFC en reposo se asociaba con menores tiempos de reacción y menos errores de comisión en situaciones de presión (Laborde et al., 2019). Por tanto, medir la VFC puede ayudar a los entrenadores a monitorizar el estado de preparación cognitiva y la capacidad de autorregulación emocional de los deportistas.

7.2.2.3. Flexibilidad cognitiva.

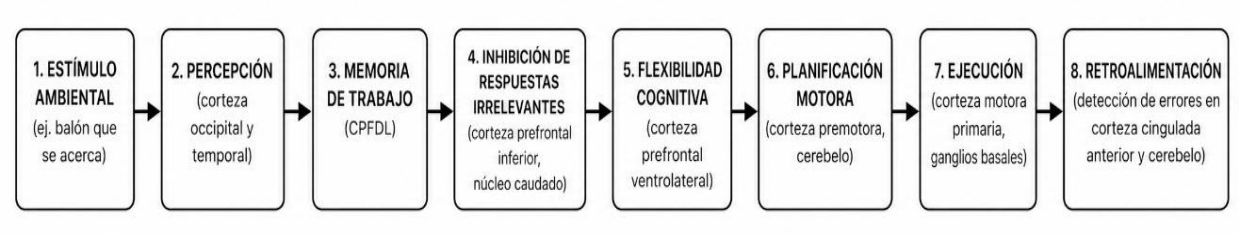
La flexibilidad cognitiva (FC) permite cambiar entre diferentes reglas, perspectivas o estrategias ante demandas cambiantes (Monsell, 2003). En deportes abiertos —aquellos que se desarrollan en entornos impredecibles—, la FC es crucial: un base de baloncesto debe alternar entre defender, atacar, realizar un bloqueo o pasar el balón según evolucione la jugada. Estudios con jugadores de hockey sobre hielo mostraron que los atletas con mayor FC obtenían mejores

puntuaciones en creatividad táctica (Memmert, 2006). Además, la FC se relaciona con la capacidad de readaptar un plan de juego tras un golpe de mala suerte o una decisión arbitral adversa.

Tabla 1. Componentes de las funciones ejecutivas, correlatos neurales y ejemplos deportivos

Componente	Definición operativa	Regiones cerebrales clave	Ejemplo en deporte
Memoria de trabajo	Mantener y manipular información temporalmente	CPFDL, lóbulo parietal, ganglios basales	Un base recuerda la jugada asignada mientras dribla y observa la defensa.
Control inhibitorio	Suprimir respuestas automáticas o distracciones	Corteza prefrontal inferior, núcleo caudado, corteza cingulada anterior	Un delantero inhibe el disparo cuando ve al portero adelantado y opta por el pase.
Flexibilidad cognitiva	Cambiar entre reglas, estrategias o perspectivas	Corteza prefrontal ventrolateral, ganglios basales, cerebelo	Un tenista cambia de golpe de fondo a dejada según la posición del rival.

Figura 1 (Procesamiento neural durante una acción deportiva)



Nota: Las flechas de retroalimentación permiten ajustes en línea mediante monitoreo continuo.

7.2.3. Evidencia empírica de la relación entre funciones ejecutivas y rendimiento deportivo.

En la última década, numerosos estudios han examinado la asociación entre FE y rendimiento en deportistas de diferentes niveles y disciplinas.

Fútbol: Vestberg et al. (2017) evaluaron FE en 57 jóvenes futbolistas de élite (15-16 años) mediante pruebas neuropsicológicas (Torre de Londres, test de Stroop, dígitos en orden inverso). Los resultados mostraron que la MT y la inhibición predecían significativamente el número de goles y asistencias en una temporada, incluso después de controlar el nivel de condición física.

Deportes de equipo en edad escolar: Un meta-análisis de Álvarez-Bueno et al. (2017) concluyó que la participación en deportes estructurados mejora las FE en niños y adolescentes, con efectos más pronunciados en flexibilidad cognitiva y control inhibitorio.

Deportes de combate y precisión: La planificación estratégica y el control inhibitorio se relacionan con la ejecución de rutinas complejas bajo presión competitiva, reduciendo los errores de omisión y comisión (Hüttermann et al., 2019).

Es importante señalar que la mayoría de estos estudios son de tipo transversal o cuasi-experimental, por lo que no permiten establecer causalidad. No obstante, los diseños longitudinales disponibles sugieren que la práctica deportiva sistemática produce mejoras en FE, y que a su vez un mayor nivel basal de FE facilita el aprendizaje de tareas tácticas complejas (Ishihara et al., 2021).

7.2.4. Fatiga mental y su impacto en las funciones ejecutivas durante la competición.

La fatiga mental es un estado psicobiológico inducido por períodos prolongados de actividad cognitiva exigente (Marcora et al., 2009). En el contexto deportivo, se ha demostrado que realizar una tarea mentalmente agotadora (por ejemplo, 30 minutos del test de vigilancia psicomotora) antes de un partido reduce la precisión de los pases, la velocidad de toma de decisiones y el control inhibitorio (Smith et al., 2018).

Los mecanismos propuestos incluyen una disminución de la actividad en la corteza prefrontal dorsolateral (CPFDL), acompañada de un aumento de la percepción de esfuerzo sin cambios en la capacidad cardiorrespiratoria (Van Cutsem et al., 2017). Esto implica que la fatiga mental afecta el rendimiento principalmente a nivel central, no muscular.

Para los entrenadores, estas evidencias sugieren la conveniencia de evitar sesiones de entrenamiento cognitivo intensivo antes de competiciones importantes, así como implementar estrategias de recuperación mental (microdescansos, musicoterapia, técnicas de respiración) que mitiguen la fatiga mental.

7.2.5. Entrenamiento cognitivo y ejercicio físico para mejorar las funciones ejecutivas en deportistas.

Existen dos aproximaciones complementarias para potenciar las FE en el ámbito deportivo: el entrenamiento cognitivo y el entrenamiento físico estructurado (Moreau & Chou, 2019).

7.2.5.1. Entrenamiento cognitivo.

Consiste en ejercitar las FE mediante tareas adaptadas al contexto deportivo. Por ejemplo, simuladores de realidad virtual en los que el futbolista debe inhibir la respuesta de pasar al jugador marcado y elegir otra opción; juegos de ordenador como el "dual n-back" se han utilizado también para mejorar la MT y la flexibilidad cognitiva (Schwaighofer et al., 2015). Aunque existen controversias sobre la transferencia a situaciones reales de juego, los programas que integran ejercicios ejecutivos con movimientos deportivos específicos parecen producir mejoras más robustas.

7.2.5.2. Ejercicio físico y funciones ejecutivas.

La actividad aeróbica regular (correr, nadar, montar en bicicleta) se asocia con volúmenes más altos de materia gris en regiones prefrontales y con un mejor rendimiento en pruebas de inhibición y flexibilidad cognitiva (Erickson et al., 2011). Incluso el ejercicio agudo de intensidad moderada (20-30 minutos) produce efectos positivos transitorios sobre la memoria de trabajo (Chang et al., 2012). Por tanto, integrar en los calentamientos activos ejercicios que requieran coordinación y toma de decisiones (circuitos con cambios de dirección, tareas de "go/no-go" motores) puede preparar tanto el cuerpo como el cerebro para la competición.

7.2.6. Evaluación neuropsicológica de las funciones ejecutivas en deportistas.

La evaluación objetiva de las FE es relevante para la detección de talentos, el diseño de planes de entrenamiento personalizados y el seguimiento de la recuperación tras una conmoción cerebral. En esta sección se describen las principales herramientas disponibles y su aplicación en el contexto deportivo.

7.2.6.1. Baterías neuropsicológicas tradicionales aplicadas al deporte.

Las pruebas más utilizadas en el ámbito de la neuropsicología deportiva incluyen:

Test de Stroop: Evalúa el control inhibitorio y la resistencia a la interferencia. El deportista debe nombrar el color de la tinta de palabras incongruentes (ej. "rojo" escrito

en azul). Se ha utilizado en futbolistas y jugadores de rugby para medir la capacidad de suprimir respuestas automáticas (Verburgh et al., 2014).

Trail Making Test (TMT) partes A y B: Mide la velocidad de procesamiento y la flexibilidad cognitiva (alternancia entre números y letras). En deportes de equipo, un menor tiempo de ejecución en la parte B se asocia con una mejor capacidad de cambio de tarea durante el juego (Vestberg et al., 2017).

Prueba de dígitos en orden inverso (WAIS): Evalúa la memoria de trabajo verbal. Se ha correlacionado con la capacidad de mantener la información táctica en jugadores de baloncesto bajo presión defensiva.

Torre de Londres (TOL): Mide la planificación estratégica y la resolución de problemas. Los deportistas con mejores puntuaciones en TOL cometen menos errores tácticos en deportes de oposición (Furley & Memmert, 2010).

7.2.6.2. Herramientas computarizadas específicas para deportistas.

En la última década se han desarrollado baterías neuropsicológicas computarizadas validadas para el entorno deportivo, que ofrecen la ventaja de una administración estandarizada y la posibilidad de realizar evaluaciones seriadas.

CogSate Sport: Es una batería breve (15-20 minutos) que evalúa atención, memoria de trabajo, velocidad de procesamiento y función ejecutiva. Ha sido ampliamente utilizada en la evaluación de conmociones cerebrales en atletas de la NFL, la NHL y el fútbol australiano (Collins et al., 2014). Proporciona puntuaciones basales y permite la comparación post-lesión.

ImPACT (Immediate Post-Concussion Assessment and Cognitive Testing): Es la herramienta más extendida en deportes de contacto. Evalúa memoria verbal y visual, tiempo de reacción, velocidad de procesamiento y control inhibitorio. Su uso es recomendado por consensos internacionales para el manejo de conmociones (McCrea et al., 2013).

AX-CPT (AX-Continuous Performance Task) adaptada al deporte: Evalúa el mantenimiento de la intención y el control inhibitorio proactivo. Versiones con estímulos deportivos (ej. reconocimiento de jugadores con y sin balón) han mostrado sensibilidad a la fatiga mental en futbolistas (Smith et al., 2018).

7.2.7. Evaluación ecológica mediante realidad virtual y seguimiento ocular.

Para superar las limitaciones de las pruebas de laboratorio, se están desarrollando entornos de realidad virtual que simulan situaciones reales de juego (ej. un penalti en fútbol o un tiro libre en baloncesto). Estas herramientas permiten medir la toma de decisiones ejecutiva en tiempo real, con mayor validez ecológica (Hüttermann et al., 2019). Además, el seguimiento ocular (eye-tracking) combinado con pruebas de inhibición permite analizar hacia dónde dirige el atleta su atención bajo presión y cómo suprime miradas a distracciones.

7.2.8. Utilidad práctica para entrenadores y cuerpos técnicos.

Se recomienda realizar una evaluación basal de las FE al inicio de cada temporada (especialmente en deportes de contacto) para:

Detectar déficits que puedan aumentar el riesgo de lesión o afectar el rendimiento táctico.
Disponer de una referencia ante una posible conmoción cerebral.
Personalizar el entrenamiento cognitivo según el perfil ejecutivo de cada deportista (por ejemplo, si un jugador tiene baja inhibición, priorizar ejercicios de stop-signal).

Las baterías como CogState o ImPACT son de fácil administración y no requieren un psicólogo clínico para su interpretación básica, aunque siempre se recomienda la supervisión de un neuropsicólogo deportivo.

7.2.9. Aplicaciones prácticas para entrenadores y preparadores físicos.

A partir de la evidencia revisada, se proponen las siguientes recomendaciones:

1. Incluir tareas de doble tarea cognitivo-motora en los entrenamientos (por ejemplo, realizar ejercicios de pase mientras se hace una resta mental). Esto entrena la MT y la distribución atencional.
2. Diseñar juegos reducidos con reglas cambiantes (por ejemplo, que cada 2 minutos el valor de los goles sea distinto, o que los jugadores deban intercambiar posiciones). Se mejora la flexibilidad cognitiva.
3. Utilizar señales de parada (stop-signal) en ejercicios técnicos (por ejemplo, un silbido inesperado congela la jugada y obliga a reiniciarla). Se fortalece el control inhibitorio.
4. Periodizar la carga cognitiva de manera similar a la carga física: evitar tareas de alta demanda ejecutiva antes de competiciones importantes para prevenir la fatiga mental.

5. Evaluar las FE de manera basal en cada deportista, especialmente en aquellos con antecedentes de conmociones cerebrales, utilizando baterías como CogState Sport o ImPACT.
6. Monitorizar la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) en reposo y durante tareas de presión como un indicador del estado de control inhibitorio. Un descenso de la VFC de alta frecuencia puede señalar fatiga mental o sobreentrenamiento cognitivo.

Estas estrategias tienen un nivel de evidencia B (recomendación basada en estudios cuasi-experimentales y en revisiones sistemáticas), por lo que se sugiere un seguimiento personalizado.

7.2.10. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras.

A pesar del creciente interés en el papel de las FE en el deporte, existen limitaciones importantes:

La mayoría de los estudios son transversales, por lo que no se puede inferir causalidad. Se necesitan ensayos controlados aleatorizados con seguimiento a largo plazo.

Las baterías neuropsicológicas tradicionales no siempre reflejan las demandas ejecutivas específicas de cada deporte. Sería útil desarrollar tareas ecológicas con realidad virtual.

El efecto del entrenamiento cognitivo sobre el rendimiento deportivo real (no solo sobre tests de laboratorio) aún es controvertido. Futuras investigaciones deberían incluir medidas directas de rendimiento competicional.

No se han analizado suficientemente las diferencias de sexo o las interacciones con factores genéticos (por ejemplo, polimorfismo BDNF Val66Met) en la respuesta al entrenamiento.

Aunque la VFC es un biomarcador prometedor, su utilidad práctica en el día a día del entrenador requiere dispositivos validados y protocolos estandarizados.

7.3. CONCLUSIONES

Las funciones ejecutivas —memoria de trabajo, control inhibitorio y flexibilidad cognitiva— constituyen un conjunto de habilidades esenciales para la planificación y ejecución de acciones deportivas en entornos dinámicos y de presión temporal. La evidencia actual apoya que un mayor nivel de FE se asocia con un mejor rendimiento en deportes de equipo y de precisión.

El ejercicio físico aeróbico y el entrenamiento cognitivo específico pueden mejorar estas capacidades, y su integración planificada en las rutinas de entrenamiento puede suponer una ventaja competitiva. Además, se ha destacado el papel de la plasticidad cerebral inducida por el deporte y la utilidad de la variabilidad de la frecuencia cardíaca como un biomarcador accesible del control inhibitorio.

La evaluación neuropsicológica mediante herramientas como CogState Sport o ImPACT permite monitorizar el estado cognitivo de los deportistas y gestionar las conmociones cerebrales. No obstante, se requieren más estudios longitudinales y ecológicamente válidos para establecer pautas definitivas.

Los profesionales del deporte deberían considerar la evaluación y el entrenamiento de las FE como un componente más de la preparación integral del atleta, junto con las cualidades físicas, técnicas y tácticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez-Bueno, C., Pesce, C., Cavero-Redondo, I., Sánchez-López, M., Martínez-Hortelano, J. A., & Martínez-Vizcaíno, V. (2017). The effect of physical activity interventions on children's cognition and metacognition: A systematic review and meta-analysis. Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry, 56(9), 729-738. https://doi.org/10.1016/j.jaac.2017.06.012

Baddeley, A. D. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. Nature Reviews Neuroscience, 4(10), 829-839. https://doi.org/10.1038/nrn1201

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, 87-101. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2012.02.068

Collins, M. W., Kontos, A. P., Reynolds, E., Murawski, C. D., & Fu, F. H. (2014). The use of computerized neuropsychological testing in the management of sport-related concussion. American Journal of Sports Medicine, 42(6), 1456-1463. https://doi.org/10.1177/0363546514525065

Diamond, A. (2013). Executive functions. Annual Review of Psychology, 64, 135-168. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750

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, 108(7), 3017-3022. https://doi.org/10.1073/pnas.1015950108

Furley, P., & Memmert, D. (2010). The role of working memory in sport. International Review of Sport and Exercise Psychology, 3(2), 171-194. https://doi.org/10.1080/1750984X.2010.526238

Hüttermann, S., Ford, P. R., Williams, A. M., Varga, M., & Smeeton, N. J. (2019). Attention, perception, and action in a simulated decision-making task. Journal of Sport and Exercise Psychology, 41(4), 213-222. https://doi.org/10.1123/jsep.2018-0274

Ishihara, T., Sugasawa, S., Matsuda, Y., & Mizuno, M. (2021). Relationship between sports experience and executive function in 6- to 8-year-old children. Journal of Physical Activity and Health, 18(2), 157-164. https://doi.org/10.1123/jpah.2020-0122

Khodayari, S., Karimi, S., & Jalali, S. (2020). Effects of endurance training on dendritic spine density in the striatum and prefrontal cortex. Neuroscience Letters, 735, 135246. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2020.135246

Koziol, L. F., Budding, D. E., & Chidekel, D. (2013). The development of motor skills, executive functions, and a relationship to ADHD: A preliminary review. En ADHD as a Model of Brain-Behavior Relationships (SpringerBriefs in Neuroscience, pp. 45-58). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8382-5_4

Laborde, S., Mosley, E., & Mertgen, A. (2019). Heart rate variability and sport performance: A systematic review. Frontiers in Psychology, 10, 1514. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01514

Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. Journal of Applied Physiology, 106(3), 857-864. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.91324.2008

McCrea, M., Guskiewicz, K. M., Randolph, C., Barr, W. B., Hammeke, T. A., Marshall, S. W., & Kelly, J. P. (2013). Incidence, clinical course, and predictors of prolonged recovery time following sport-related concussion. Journal of the International Neuropsychological Society, 19(1), 22-33. https://doi.org/10.1017/S1355617712000881

Memmert, D. (2006). The effects of high, medium, and low levels of physical activity on creative thinking in children. European Journal of Sport Science, 6(2), 97-105. https://doi.org/10.1080/17461390500517939

Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. Annual Review of Neuroscience, 24, 167-202. https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167

Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. Cognitive Psychology, 41(1), 49-100. https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734

Monsell, S. (2003). Task switching. Trends in Cognitive Sciences, 7(3), 134-140. https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00028-7

Moreau, D., & Chou, E. (2019). The acute effect of high-intensity exercise on executive function: A meta-analysis. Perspectives on Psychological Science, 14(5), 734-764. https://doi.org/10.1177/1745691619850568

Schwaighofer, M., Fischer, F., & Bühner, M. (2015). Does working memory training transfer? A meta-analysis including training conditions as moderators. Educational Psychologist, 50(2), 138-166. https://doi.org/10.1080/00461520.2015.1036274

Smith, M. R., Thompson, C., Marcora, S. M., Skorski, S., Meyer, T., & Coutts, A. J. (2018). Mental fatigue and soccer: Current knowledge and future directions. Sports Medicine, 48(7), 1525-1532. https://doi.org/10.1007/s40279-018-0908-2

Van Cutsem, J., Marcora, S., De Pauw, K., Bailey, S., Meeusen, R., & Roelands, B. (2017). The effects of mental fatigue on physical performance: A systematic review. Sports Medicine, 47(8), 1569-1588. https://doi.org/10.1007/s40279-016-0672-0

Verburgh, L., Königs, M., Scherder, E. J. A., & Oosterlaan, J. (2014). Physical exercise and executive functions in preadolescent children, adolescents and young adults: A meta-analysis. British Journal of Sports Medicine, 48(12), 973-979. https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091441

Vestberg, T., Reinebo, G., Maurex, L., Ingvar, M., & Petrovic, P. (2017). Core executive functions are associated with success in young elite soccer players. PLoS ONE, 12(2), e0170845. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170845

Wei, G., Zhang, Y., Jiang, T., & Luo, J. (2018). Increased gray matter volume in athletes: A structural MRI study. Brain Structure and Function, 223(3), 1345-1355. https://doi.org/10.1007/s00429-017-1565-3

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. https://doi.org/10.1016/j.nlm.2006.11.003

CAPITULO 8: NEUROPSICOLOGÍA DEL ESTRÉS Y LA ANSIEDAD EN EL DEPORTE: Autor: Lcdo. Ricardo José Jiménez González, Msc.

NEUROPSICOLOGÍA DEL ESTRÉS Y LA ANSIEDAD EN EL DEPORTE

NEUROPSYCHOLOGY OF STRESS AND ANXIETY IN SPORT

Autor: Lcdo. Ricardo José Jiménez González, Msc.

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6740-9703

Correo: rjimenezg@utb.edu.ec

Resumen

El estrés y la ansiedad son fenómenos psicológicos y neurobiológicos que afectan de manera significativa el rendimiento deportivo, especialmente en contextos de alta exigencia competitiva. Este capítulo revisa la evidencia actual sobre los mecanismos neuropsicológicos que subyacen a la respuesta de estrés y la ansiedad en el deporte, analizando el papel del eje hipotálamo-hipófisis-adrenal, los neurotransmisores implicados (cortisol, dopamina, serotonina, noradrenalina), y las estructuras cerebrales clave (amígdala, hipocampo, corteza prefrontal). Se examinan las consecuencias cognitivas y emocionales del estrés crónico y la ansiedad competitiva, incluyendo sus efectos sobre la atención, la memoria, la toma de decisiones, el aprendizaje motor, el burnout y el riesgo de lesiones. Se discuten las principales teorías explicativas, como la Teoría de la U invertida, y se presentan estrategias de intervención neuropsicológica basadas en la evidencia, incluyendo técnicas de regulación emocional, mindfulness y biofeedback. Finalmente, se proponen recomendaciones prácticas para entrenadores y psicólogos deportivos, y se señalan las limitaciones de la investigación actual y futuras líneas de estudio.

Palabras clave: estrés, ansiedad, neuropsicología, deporte, rendimiento, regulación emocional.

Abstrac

Stress and anxiety are psychological and neurobiological phenomena that significantly affect athletic performance, especially in highly competitive contexts. This chapter reviews the current evidence on the neuropsychological mechanisms underlying the stress and anxiety response in sport, analyzing the role of the hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis, the neurotransmitters involved (cortisol, dopamine, serotonin, norepinephrine), and key brain structures (amygdala, hippocampus, prefrontal cortex). The cognitive and emotional consequences of chronic stress and competitive anxiety are examined, including their effects on attention, memory, decision-making, motor learning, burnout, and injury risk. Major explanatory theories, such as the Inverted-U Theory, are discussed, and evidence-based neuropsychological intervention strategies are presented, including emotion regulation techniques, mindfulness, and biofeedback. Finally, practical recommendations are proposed for

coaches and sports psychologists, and the limitations of current research and future lines of study are noted.

Keywords: stress, anxiety, neuropsychology, sport, performance, emotion regulation.

8.1. INTRODUCCIÓN

El deporte de alto rendimiento demanda no solo habilidades físicas sobresalientes, sino también un equilibrio mental que permita al deportista afrontar la presión competitiva, las exigencias del entrenamiento y las expectativas externas. En este contexto, el estrés y la ansiedad se han convertido en factores psicológicos que afectan de manera significativa el rendimiento deportivo (Jones & Hardy, 1990; Tossici et al., 2024).

La neuropsicología deportiva ha permitido comprender cómo la ansiedad elevada y el estrés crónico pueden modificar capacidades cognitivas fundamentales, tales como la concentración, la toma de decisiones y la coordinación motora (Sapolsky, 2004; Lupien et al., 2009). Además, la ansiedad competitiva puede alterar la percepción del entorno, provocando reacciones desmedidas ante errores mínimos y fomentando pensamientos negativos recurrentes (Moran, 2016).

Sin embargo, el estrés no es siempre perjudicial. En niveles moderados, funciona como un estimulante que potencia la motivación, la alerta y la capacidad de respuesta frente a los desafíos (Yerkes & Dodson, 1908; Soto et al., 2023). La distinción entre sus efectos positivos y negativos reside en la capacidad del sistema nervioso para regular estas reacciones y en las estrategias psicológicas que utiliza el deportista para afrontarlas.

El objetivo principal de este capítulo es examinar cómo los procesos neuropsicológicos del estrés y la ansiedad afectan el rendimiento en el deporte. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir los mecanismos neurobiológicos de la respuesta al estrés; (2) analizar las bases neurobiológicas de la ansiedad; (3) evaluar las consecuencias cognitivas y emocionales del estrés y la ansiedad en el rendimiento deportivo; (4) discutir las principales teorías explicativas; (5) presentar estrategias de intervención neuropsicológica; y (6) derivar aplicaciones prácticas para entrenadores y psicólogos deportivos.

8.2. DESARROLLO

8.2.1 Fundamentos neurobiológicos del estrés.

Definición y fisiología del estrés.

El estrés, desde la perspectiva de la neurociencia, se define como un conjunto complejo de respuestas coordinadas entre el sistema nervioso central, el sistema endocrino y el sistema inmunitario, cuando un individuo se enfrenta a exigencias que superan su capacidad para afrontarlas (Tossici et al., 2024). Esta respuesta biológica y psicológica es fundamental para comprender cómo responden los atletas a situaciones competitivas o desafiantes, ya que el estrés no solo altera el estado emocional, sino que también afecta procesos cognitivos y fisiológicos cruciales para el rendimiento.

La respuesta de estrés se activa a través del eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HHA) (McEwen, 2007). Cuando un estímulo estresante es percibido, el hipotálamo libera la hormona liberadora de corticotropina (CRH), que estimula la hipófisis anterior para liberar la hormona adrenocorticotropa (ACTH). Esta, a su vez, actúa sobre la corteza suprarrenal, que libera cortisol (la principal hormona del estrés). Simultáneamente, el sistema nervioso simpático activa la médula suprarrenal para liberar adrenalina y noradrenalina, que preparan al organismo para la respuesta de "lucha o huida" (Sapolsky, 2004).

8.2.1.2. Estrés agudo vs. estrés crónico.

El estrés agudo es una reacción temporal del sistema en respuesta a un acontecimiento o situación específica (Ruiz-Ramirez et al., 2022). En el deporte, esto suele suceder antes o durante competiciones relevantes, instantes cruciales del juego o pruebas de alto rendimiento. El estrés agudo provoca cambios fisiológicos inmediatos que pueden ser adaptativos: aumento de la frecuencia cardíaca, movilización de glucosa y aumento de la alerta.

Estrés crónico: Ocurre cuando los factores estresantes se repiten o son continuos a lo largo de un tiempo extenso, excediendo la capacidad del cuerpo para recuperarse (Aguirre-Siancas et al., 2022). En el deporte, se relaciona con una presión constante por los resultados, cargas físicas excesivas, expectativas elevadas o ausencia de descanso adecuado. A diferencia del estrés agudo, el estrés crónico no permite una recuperación total entre exposiciones, asociándose con un incremento de la carga emocional y fatiga fisiológica acumulada.

8.2.2. Función adaptativa del estrés en el rendimiento deportivo.

El estrés desempeña una función adaptativa fundamental cuando es agudo y se mantiene en niveles no excesivos (Lastre & Barceló, 2023). Actúa como una señal de alerta que activa recursos psicológicos y fisiológicos para afrontar retos, optimiza la concentración y puede aumentar el rendimiento en circunstancias competitivas. Este proceso adaptativo se fundamenta

en la estimulación de redes neurológicas que facilitan la respuesta ante requerimientos variables.

No obstante, esta capacidad de adaptación tiene sus límites. Si los factores estresantes se prolongan o superan la capacidad de control fisiológico, el estrés abandona su papel beneficioso y se convierte en un elemento que perjudica progresivamente la salud mental y el rendimiento del deportista (McEwen, 2007). La distinción entre eustrés (estrés positivo, motivador) y distrés (estrés negativo, perjudicial) es crucial en el contexto deportivo.

8.2.3. Las bases neurobiológicas de la ansiedad.

La ansiedad no se origina en una única estructura cerebral, sino que es el resultado de la acción compleja de diversas áreas y redes neuronales que procesan información afectiva, contextual y crítica (Morales Muñoz & Ignacio Victoriano, 2024). Estas áreas se comunican entre sí para identificar peligros, evaluar amenazas y regular las reacciones emocionales a factores percibidos como amenazantes.

8.2.4. El Papel de la amígdala cerebral.

Ubicada en el lóbulo temporal, la amígdala constituye una estructura subcortical importante del sistema límbico (Montero et al., 2025). Su función principal consiste en actuar como un centro de detección y evaluación de estímulos emocionales, especialmente aquellos vinculados con el miedo y la ansiedad. Su papel principal es procesar señales de riesgo o inseguridad y coordinar respuestas conductuales y fisiológicas que posibiliten una reacción rápida del organismo frente a una amenaza potencial.

En situaciones de ansiedad, la amígdala muestra una hiperactivación que tiene un impacto directo en la percepción subjetiva de peligro (González & Parra, 2023). Esta hiperactivación libera más señales neuronales hacia otras zonas del cerebro, intensificando la sensación de amenaza y pudiendo llevar a una respuesta fisiológica más fuerte, como la activación del eje HHA y el incremento de los latidos cardíacos.

8.2.5. Intervención del hipocampo y memoria emocional.

El hipocampo es otra parte del sistema límbico que desempeña un rol crucial en la memoria y la contextualización de eventos emocionales (Guevara, 2023). Su función principal es la consolidación de experiencias y la memoria espacial; sin embargo, su intervención en la ansiedad se basa en cómo contextualiza factores amenazantes a partir de experiencias previas.

El hipocampo regula la angustia al combinar información del contexto con vivencias emocionales pasadas, lo que permite al cerebro diferenciar entre circunstancias realmente peligrosas y las que no lo son (Salgado, 2022). Esta integración disminuye las reacciones de ansiedad inapropiadas cuando el entorno no lo requiere. Es importante destacar que el hipocampo es especialmente sensible al cortisol, y el estrés crónico puede reducir su volumen y afectar la memoria (Lupien et al., 2009; Sapolsky, 2004).

8.2.6. Regulación de la corteza prefrontal.

La corteza prefrontal (CPF) es la zona del cerebro relacionada con las funciones ejecutivas superiores: regulación de emociones, control inhibitorio, planificación y toma de decisiones (Polania, 2022). Desde una perspectiva neurobiológica, la CPF regula el funcionamiento de la amígdala y otros componentes límbicos a través de conexiones inhibitorias. Esta regulación jerárquica permite que las estrategias cognitivas disminuyan las reacciones emocionales desadaptativas.

En situaciones de ansiedad patológica, puede existir un mal funcionamiento en la comunicación entre la amígdala y la CPF: la función prefrontal no es lo suficientemente efectiva para suprimir la reacción emocional excesiva producida por la amígdala (González & Parra, 2023). Esta desregulación se ha asociado con trastornos de ansiedad y con una menor capacidad para manejar el estrés competitivo en deportistas (Moran, 2016).

8.2.7. Neurotransmisores implicados en el estrés y la ansiedad.

Los neurotransmisores son mensajeros químicos esenciales para la interacción entre neuronas, y tienen un impacto directo en cómo el cerebro reacciona ante el estrés, controla el estado de ánimo y favorece la adaptación del comportamiento (Holguín et al., 2023). Comprender la interacción de estos neurotransmisores facilita explicar las variaciones en el rendimiento competitivo de los deportistas.

Neurotransmisor	Función principal	Efecto en el deporte	Estrategias de regulación
Cortisol	Hormona del estrés; moviliza energía; regula la respuesta inflamatoria	Niveles elevados crónicos afectan la memoria, el aprendizaje y el estado de ánimo; reducen la capacidad de recuperación	Técnicas de relajación, sueño adecuado, periodización del entrenamiento

Neurotransmisor	Función principal	Efecto en el deporte	Estrategias de regulación
Dopamina	Motivación, recompensa, placer, control motor	Aumenta la motivación y el refuerzo positivo; mejora el aprendizaje de habilidades	Establecimiento de metas, refuerzo positivo, feedback de logros
Serotonina	Regulación del estado de ánimo, ansiedad, sueño, apetito	Niveles adecuados favorecen la estabilidad emocional y reducen la ansiedad	Ejercicio físico regular, exposición solar, dieta rica en triptófano
Noradrenalina	Activación fisiológica, alerta, atención	Mejora la atención y la velocidad de respuesta en situaciones de estrés agudo; niveles excesivos pueden causar ansiedad	Técnicas de respiración, manejo de la activación

Cortisol y respuesta al estrés.

El cortisol es la principal hormona del estrés. Durante el estrés agudo, su liberación es adaptativa, ya que moviliza glucosa para el cerebro y los músculos y suprime funciones no esenciales (Barba et al., 2022). Sin embargo, niveles altos y sostenidos de cortisol durante el estrés crónico afectan negativamente la gestión de otros neurotransmisores como la dopamina, la serotonina y la noradrenalina, impactando el bienestar emocional y la función cognitiva (Lupien et al., 2009).

La Dopamina.

La dopamina es un neurotransmisor monoaminérgico clave en los sistemas relacionados con la satisfacción, la motivación y el control motor (West, 2023). Su liberación está vinculada con sensaciones de gratificación, impulso y refuerzo del comportamiento. Para los atletas, la dopamina es fundamental para mantener la motivación y el disfrute en el deporte, especialmente después de cumplir metas o recibir recompensas por su rendimiento (Dayan & Cohen, 2011).

La Serotonina.

La serotonina es otro neurotransmisor importante que regula el equilibrio emocional, la ansiedad y el estado de ánimo (Fernández & Marín, 2024). Para los deportistas que enfrentan presión competitiva constante, un nivel apropiado de serotonina es esencial para mantener una sensación de bienestar, tranquilidad y manejo emocional equilibrado. Alteraciones en los niveles de serotonina se han vinculado con problemas para manejar las emociones y con una mayor vulnerabilidad a la ansiedad (Moran, 2016).

Noradrenalina y activación fisiológica.

La noradrenalina es una catecolamina que funciona como neurotransmisor y como hormona activadora (Fernández et al., 2025). Su función es crucial para la respuesta de "lucha o huida": aumenta la atención, el ritmo cardíaco y la movilización de recursos fisiológicos para enfrentar circunstancias desafiantes. En situaciones de estrés, la noradrenalina se libera en estructuras cerebrales que influyen en la concentración, la alerta y la velocidad de respuesta, contribuyendo a un incremento temporal en la rapidez de toma de decisiones.

8.2.8. Consecuencias cognitivas del estrés y la ansiedad en el deporte.
La atención y concentración.

La concentración y la atención son procesos cognitivos fundamentales para los deportistas, especialmente en situaciones competitivas donde una variedad de estímulos puede influir en el rendimiento (Jaramillo, 2022). Estas funciones permiten seleccionar, focalizar y mantener el enfoque mental en factores pertinentes para la ejecución de la tarea.

La ansiedad y el estrés pueden consumir recursos cognitivos, afectando la capacidad para mantener la atención en la tarea deportiva (Castillo, 2022). Los distractores pueden ser internos (sentimientos, pensamientos o sensaciones físicas no vinculadas directamente con la tarea, como temores a fracasar o inquietudes sobre el éxito) o externos (ruido del público, provocaciones del adversario). Bajo presión, la atención tiende a estrecharse, lo que aumenta las posibilidades de distracción y errores técnicos o tácticos (Gaitán et al., 2022).

8.2.9. Toma de decisiones y control de impulsos.
En circunstancias de competición, la toma de decisiones es compleja: requiere evaluar la información sensorial, prever consecuencias y seleccionar una respuesta efectiva (Orellana & Oscco, 2023). La respuesta emocional puede obstaculizar el análisis lógico, especialmente cuando hay ansiedad o estrés.

Las decisiones pueden tener su origen en procedimientos automáticos (rápidos, basados en experiencias previas) o racionales (más lentos y meditados) (Gómez et al., 2023). Cuando la ansiedad es elevada, existe una inclinación a favorecer reacciones impulsivas, lo que deteriora la calidad de las decisiones. La sobrecarga emocional agota los recursos mentales requeridos para procesar información con eficacia, ampliando las posibilidades de decisiones equivocadas (Sánchez & Silva, 2024).

8.2.10. La memoria, aprendizaje y rendimiento técnico.

El estrés sostenido afecta directamente los procesos de aprendizaje y memoria (Alvarez, 2023). Las hormonas del estrés, especialmente el cortisol, influyen en la formación de la memoria a largo plazo. Estudios han demostrado que el cortisol elevado deteriora la consolidación de la memoria declarativa y puede afectar la memoria de trabajo (Lupien et al., 2009). En el deporte, esto implica dificultades para retener estrategias tácticas y asimilar modificaciones técnicas.

Las consecuencias directas afectan tanto el entrenamiento como el rendimiento técnico (Cano et al., 2024). Si la capacidad para retener tácticas se ve comprometida, los entrenamientos pueden perder eficacia, porque los deportistas no asimilan completamente las modificaciones técnicas y no afianzan lo aprendido tácticamente. Esto puede hacer que los períodos de entrenamiento sean más largos y menos eficaces.

8.2.11. La Fatiga mental, burnout y desgaste emocional.

El burnout deportivo (síndrome de desgaste en deportistas) se refiere a un estado de desgaste físico, mental y psicológico que surge después de una exposición prolongada a elevados niveles de estrés competitivo y de entrenamiento, sin lapsos apropiados para descansar (Garcia De Concepcion, 2023). Trasciende el simple cansancio, presentándose como un descenso significativo en la productividad y el bienestar del deportista.

El agotamiento se ve incrementado por elementos como: la presión continua para rendir al máximo, las expectativas de entrenadores, patrocinadores o el público, la falta de equilibrio entre la vida personal y la deportiva, y una recuperación psicológica deficiente entre sesiones (Graña, 2023).

Una de las secuelas más evidentes del burnout y de la fatiga emocional a largo plazo es la desmotivación. La satisfacción con el deporte disminuye cuando los atletas experimentan agotamiento mental prolongado, lo que a menudo resulta en una falta de interés en la práctica y la competición, llegando a sentir que el deporte ya no les brinda placer ni satisfacción (Graña,

2023). Esto puede llevar al abandono de la práctica deportiva, especialmente cuando el deportista siente que su dedicación no lleva a avances importantes.

8.2.12. El Estrés, ansiedad y riesgo de lesiones.

La conexión entre la condición física, el estrés y la ansiedad no solo afecta aspectos cognitivo-emocionales, sino también la capacidad motora y las probabilidades de padecer lesiones deportivas (Guimbard et al., 2024).

El estrés competitivo y los estados de ansiedad emocional pueden modificar la sincronización motora, aumentando las probabilidades de cometer errores técnicos que causen daños físicos (Sánchez et al., 2025). Investigaciones con futbolistas jóvenes han mostrado que cuando los niveles de ansiedad competitiva son altos, también lo es el número de lesiones, debido a la inseguridad y desorientación.

La recuperación tras una lesión deportiva incluye la restauración de los tejidos a nivel fisiológico, así como la sanación neurológica y psicológica (Archila et al., 2023). Los métodos de rehabilitación deben incluir no solo el componente físico, sino también el estado emocional del deportista, ya que la sanación es más lenta y la integración a la competición más difícil cuando se experimenta estrés post-lesión.

8.2.13. La Teorías explicativas del estrés y el rendimiento.

Teoría de la U invertida (Yerkes-Dodson)

La Teoría de la U invertida, formulada por Yerkes y Dodson (1908), sostiene que existe una relación curvilínea entre el nivel de activación (arousal) y el rendimiento (Soto et al., 2023). El rendimiento se incrementa a medida que la activación pasa de niveles bajos a un punto óptimo; sin embargo, después de ese punto, cualquier incremento adicional en la activación causa una reducción del rendimiento.

Bajo estrés: El deportista puede sentirse desmotivado o agotado, lo que obstaculiza la concentración y el desempeño técnico (Iza & Eugenio, 2023).

Estrés moderado (óptimo): El desempeño mejora gracias a una mayor atención, respuesta física y alerta (Salom, 2023).

Alto estrés: La tensión excesiva genera una sobrecarga emocional y cognitiva que afecta las destrezas motoras, la concentración y la resolución de problemas, provocando un declive del rendimiento.

El nivel ideal de activación puede estar condicionado por la dificultad de la tarea, la destreza del deportista y el deporte que se realiza. En deportes que requieren precisión, el punto óptimo suele ser más bajo que en deportes de fuerza o potencia (Jones & Hardy, 1990).

8.2.14. Críticas y modelos alternativos.

Aunque la Teoría de la U invertida es ampliamente conocida, ha sido criticada por su simplicidad. No explica diferencias individuales (personalidad, experiencia, sexo) ni la influencia de la ansiedad cognitiva vs. somática. Modelos más recientes, como la Teoría de la Ansiedad de Procesamiento (Eysenck & Calvo, 1992), distinguen entre la ansiedad cognitiva (preocupación) y la ansiedad somática (activación fisiológica), sugiriendo que la primera tiene un efecto más perjudicial sobre el rendimiento.

Figura 1. Teoría de la U invertida (Yerkes-Dodson)



Nota: La curva muestra que el rendimiento es máximo en un nivel moderado de activación (estrés óptimo). Niveles bajos o altos de activación producen un rendimiento inferior.

Diferencias individuales en la respuesta al estrés.

No todos los deportistas reaccionan de la misma manera al estrés ni se aproximan a un nivel óptimo de activación. Existen variaciones individuales que impactan la manera en que cada persona gestiona el estrés competitivo y controla sus reacciones cognitivas y emocionales.

Personalidad: Características como la extraversión y la estabilidad emocional se relacionan con una mejor tolerancia al estrés (Agustí et al., 2023).

Experiencia deportiva: Deportistas con más años de experiencia tienden a tener mejor control emocional y mayor tolerancia al estrés competitivo (Niubò et al., 2022).

Sexo: Las mujeres pueden mostrar respuestas de estrés diferentes, con una mayor reactividad del eje HHA en algunas circunstancias.

Genética: Polimorfismos en el gen del transportador de serotonina y del receptor de glucocorticoides pueden influir en la vulnerabilidad al estrés.

8.2.15. Estrategias de intervención neuropsicológica.

A partir de la evidencia revisada, se proponen las siguientes estrategias basadas en neurociencia para el manejo del estrés y la ansiedad en deportistas:

Técnicas de regulación emocional

Reestructuración cognitiva: Identificar y modificar pensamientos negativos automáticos (ej. "voy a fallar" → "he entrenado para esto").

Técnicas de respiración diafragmática: Reducen la activación simpática y aumentan la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), favoreciendo la recuperación.

Mindfulness deportivo: Entrenamiento en atención plena para mantener el foco en el momento presente y reducir la rumiación.

El Biofeedback y neurofeedback

El biofeedback (entrenamiento de la variabilidad de la frecuencia cardíaca) y el neurofeedback (entrenamiento de ondas cerebrales) permiten al deportista tomar conciencia y controlar sus respuestas fisiológicas de estrés. Estas técnicas han mostrado eficacia en la reducción de la ansiedad competitiva y la mejora del rendimiento (Moran, 2016).

Periodización del estrés

Al igual que se periodiza la carga física, se puede periodizar la carga psicológica. Introducir factores estresantes controlados durante el entrenamiento (ej. situaciones de presión) prepara al deportista para manejar el estrés competitivo real.

Entrenamiento en habilidades sociales y apoyo social

Fomentar un clima de equipo positivo y el apoyo entre compañeros reduce el impacto del estrés. El entrenador juega un papel clave en la creación de un entorno que minimice la ansiedad y promueva la autoconfianza.

Aplicaciones prácticas para entrenadores y psicólogos deportivos

1. Evaluar el nivel de estrés y ansiedad de los deportistas mediante cuestionarios validados (ej. CSAI-2, SCAT) y medidas fisiológicas (VFC, cortisol salival).
2. Individualizar las estrategias de manejo del estrés según la personalidad, experiencia y tipo de deporte del atleta.

3. Integrar técnicas de regulación emocional en los calentamientos y enfriamientos (ej. respiración consciente, visualización).
4. Periodizar la carga psicológica introduciendo factores estresantes controlados en el entrenamiento (ej. simulación de situaciones de presión).
5. Fomentar un clima motivacional orientado al dominio (en lugar de al resultado) para reducir la ansiedad.
6. Promover el descanso y la recuperación como parte fundamental del plan de entrenamiento, incluyendo estrategias de sueño y relajación.
7. Capacitar a los entrenadores en detección temprana de signos de burnout y desmotivación en sus deportistas.

8.2.16. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras

A pesar del avance en la comprensión neuropsicológica del estrés y la ansiedad en el deporte, existen limitaciones importantes:

La mayoría de los estudios se han realizado en condiciones de laboratorio, con tareas artificiales que no reflejan la complejidad de la competición real.

No se han analizado suficientemente las diferencias individuales (sexo, edad, genética) en la respuesta al estrés.

Las técnicas de neuroimagen aplicadas al deporte aún son limitadas. Futuras investigaciones deberían utilizar fNIRS y EEG portátil durante la competición.

Se necesitan ensayos controlados aleatorizados para evaluar la eficacia de las intervenciones neuropsicológicas en el rendimiento deportivo real.

La interacción entre el estrés y otros factores (nutrición, sueño, relaciones sociales) requiere más investigación.

Futuras líneas de estudio deberían explorar: (a) el uso de realidad virtual para el entrenamiento en manejo del estrés; (b) el papel de la neuroplasticidad en la adaptación al estrés competitivo; y (c) el desarrollo de protocolos personalizados basados en perfiles genéticos y neuropsicológicos.

8.3. CONCLUSIONES

El estrés y la ansiedad no son únicamente cuestiones emocionales, sino mecanismos complejos con fundamentos neuropsicológicos que afectan directamente el desempeño en el deporte. Cuando el estrés es agudo y controlado, la activación coordinada del sistema endocrino, nervioso y cognitivo tiene una función adaptativa que potencia la capacidad de respuesta frente a desafíos competitivos, así como la motivación y la concentración.

Las bases neurobiológicas de la ansiedad —la hiperactivación de la amígdala, la mala regulación de la corteza prefrontal y el papel del hipocampo en la memoria emocional— explican por qué numerosos deportistas tienen reacciones intensas frente a la presión competitiva. La ansiedad se convierte en un factor clave que puede restringir el rendimiento deportivo si no se maneja adecuadamente.

La acción de neurotransmisores como el cortisol, la dopamina, la serotonina y la noradrenalina evidencia cómo los estados de ánimo se convierten en alteraciones fisiológicas específicas que afectan el desempeño. Un nivel elevado de cortisol durante mucho tiempo puede afectar el aprendizaje y el equilibrio emocional. La Teoría de la U invertida propone que niveles moderados de activación benefician el rendimiento, mientras que el exceso lo perjudica.

Es por ello que, la respuesta al estrés no es uniforme, sino que está modulada por factores individuales como la personalidad y la experiencia deportiva. Los deportistas con mayor dominio emocional y una trayectoria más destacada consiguen equilibrar de manera más efectiva su actividad cerebral, permaneciendo cerca de su nivel óptimo de desempeño. La integración de estrategias neuropsicológicas en el entrenamiento (regulación emocional, biofeedback, periodización del estrés) puede mejorar significativamente el rendimiento y la salud mental de los deportistas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acuña, L., Esposito, L., Cipres, L., Montero, D., Barberis, M., Maria, E., Marucco, C., & Luna, E. (2025). Burnout académico y laboral, Ansiedad anticipatoria y procrastinación en estudiantes universitarios que trabajan. *XVII Congreso Internacional de Investigación y Práctica Profesional en Psicología*. https://www.aacademica.org/000-004/735

Aguirre-Siancas, E. E., Alzamora-Gonzales, L., Colona-Vallejos, E., Arone-Farfán, R., Ruiz-Ramirez, E., Portilla-Flores, O. S., ... & Lam-Figueroa, N. M. (2022). Efecto del estrés crónico y de la masticación sobre los niveles séricos de interleuquina-6 e interferón-gama. *Revista chilena de neuro-psiquiatría, 60*(4), 394-402. https://doi.org/10.4067/S0717-92272022000400394

Agustí, A. I., Martí, A., Rodríguez, A., & Gabarda, C. (2023). Personalidad, burnout y competencia digital en el profesorado universitario. *Innoeduca, 9*(2), 162-176.

Alvarez, J. (2023). *El deporte como estrategia pedagógica de permanencia y graduación estudiantil*. [Tesis de grado, Universidad Agustiniana]. http://repositorio.uniagustiniana.edu.co/handle/123456789/2000

Archila, G., Bernal, D., Hernandez, Y., & Sipagauta, J. D. (2023). *Relación entre síntomas emocionales y las estrategias de afrontamiento en deportistas que se encuentran en proceso de recuperación de una lesión deportiva*. [Tesis de grado, Universidad Autónoma de Bucaramanga]. https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/20226

Arroyo, R., Moral, J., González, Ó., & Arruza, J. (2022). Influencia del resultado en la ansiedad de futbolistas iniciados. *Revista Iberoamericana de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, 11*(2), 15-30. https://doi.org/10.24310/riccafd.2022.v11i2.14410

Barba, J., Maciel, E., & Pérez, I. (2022). Depresión, cortisol y alfametildopa en el postparto: Revisión. *Metodología, Instrumentación, Lógica, Estadística, Evidencias y Epistemología en Salud, 2*(13), 59-65.

Bingen, M., Picabea, J., Granados, C., Yanci, J., & Ascondo, J. (2025). Condición física y ansiedad competitiva en jugadores amateur de pádel. *Revista Iberoamericana de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, 14*(3), 68-82. https://doi.org/10.24310/riccafd.14.3.2025.21967

Cano, M., Romero, L., Alvarez, M., Saavedra, P., & Gaspar, D. (2024). Impacto de la actividad física en la salud mental en personas con trastornos de ansiedad y estrés. *Revista Iberoamericana de Psicología del Ejercicio y el Deporte, 19*(1), 60-69.

Castillo, S. (2022). *Revisión sistemática de ansiedad, atención y concentración en el rendimiento deportivo de fútbol*. [Tesis de grado, Universidad de ...].

Dayan, E., & Cohen, L. G. (2011). Neuroplasticity subserving motor skill learning. *Neuron, 72*(3), 443-454. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.008

Fernández, C., & Marín, R. (2024). Bienestar y serotonina. *Revista Internacional de Investigación en Adicciones, 10*(1), I-II. https://doi.org/10.28931/riiad.2024.1.01

Fernández, D., Gómez, M., Sánchez, M., Tauste, B., Garrido, M., & Cortiñas, M. (2025). Administración segura de noradrenalina por vía periférica: Una revisión sistemática. *Farmacia Hospitalaria, 49*(1), 46-52. https://doi.org/10.1016/j.farma.2024.04.003

Gaitán, O., Cardona, J., Erazo, D., & Mamian, L. (2022). Distracciones externas e internas del trabajador sanitario durante la jornada laboral: Revisión bibliográfica. *ACC CIETNA, 9*(2), 146-166. https://doi.org/10.35383/cietna.v9i2.767

Garcia De Concepcion, C. (2023). *Revisión sistemática: Influencia de la autoestima en el burnout deportivo*. [Tesis de grado, Universidad de La Laguna]. https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/33261

Gómez, L., Daza, J., & Arias, J. (2023). Inteligencia de negocios y agilidad organizacional: ¿Son relevantes la toma de decisiones racional e intuitiva? *Estudios Gerenciales, 39*(167), 181-191. https://doi.org/10.18046/j.estger.2023.167.5542

González, R., & Parra, N. (2023). Neuropsicología de los trastornos de ansiedad. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7*(1), 5206-5221. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4825

Graña, M. (2023). *Desde el engagement hasta el burnout en el ámbito deportivo. Influencia de la motivación*. [Tesis de grado, Universidad de Santiago de Compostela]. http://hdl.handle.net/10347/30893

Gross, J. J. (2015). Emotion regulation: Current status and future prospects. *Psychological Inquiry, 26*(1), 1-26. https://doi.org/10.1080/1047840X.2014.940781

Guevara, D. (2023). *Hipocampo espacio para la memoria*. [Tesis de grado, Corporación Universitaria del Caribe]. https://repositorio.cun.edu.co/handle/cun/4994

Guimbard, J. H., Camino, G., Romero, L. M., Peral, M., Brocca, M. E., & Barriga, A. (2024). Eficacia de la descompresión medular precoz versus tardía en la recuperación neurológica tras lesión medular traumática. *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología, 68*(5), 524-536. https://doi.org/10.1016/j.recot.2023.09.009

Hernández, D. (2023). Motivación, ansiedad, depresión y estrés en deportistas universitarios en tiempos de restricciones sanitarias producidas por la pandemia del covid 19. *RIAF. Revista Internacional de Actividad Física, 1*(2), 1-15. https://doi.org/10.53591/riaf.v1i2.184

Holguín, M. N. S., Jáuregui, A. R. C., Intriago, H. D. R., & Alcívar, D. C. B. (2023). Neurotransmisores y su papel en la transmisión de señales entre neuronas. *E-IDEA 4.0 Revista Multidisciplinar, 5*(15), 24-38. https://doi.org/10.53734/mj.vol5.id271

Iza, K., & Eugenio, L. (2023). Estrés percibido y características psicológicas del rendimiento deportivo en competidores federados. *PENTACIENCIAS, 5*(7), 93-107. https://doi.org/10.59169/pentaciencias.v5i7.913

Jaramillo, L. C. (2022). Revisión sistemática sobre el diagnóstico psicológico de la atención y la concentración en el fútbol. *Ciencia y Deporte, 7*(1), 148-158. https://doi.org/10.34982/2223.1773.2022.v7.no1.011

Jones, G., & Hardy, L. (1990). Stress and performance in sport. En J. G. Jones & L. Hardy (Eds.), *Stress and performance in sport* (pp. 3-22). Wiley.

Lastre, K., & Barceló, E. (2023). Vitiligo, estrés psicológico y bioquímica del cerebro: Una revisión sistemática desde la neurociencia. *Psicogente, 26*(50). https://doi.org/10.17081/psico.26.50.6399

Lupien, S. J., Maheu, F., Tu, M., Fiocco, A., & Schramek, T. E. (2009). The effects of stress and stress hormones on human cognition: Implications for the field of brain and cognition. *Brain and Cognition, 65*(3), 209-237. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2007.02.007

McEwen, B. S. (2007). Physiology and neurobiology of stress and adaptation: Central role of the brain. *Physiological Reviews, 87*(3), 873-904. https://doi.org/10.1152/physrev.00041.2006

Montero, M., Camacho, M. de los Á., Medina, D., Munoz, A., & Ruvalcaba, R. (2025). El poder oculto de la amígdala cerebral: Emociones, recuerdos y trastornos. *Investigación Permanente de la Región Norte de Jalisco, 12*, 123-136.

Morales Muñoz, M. O., & Ignacio Victoriano, M. (2024). Ensayo sobre trastorno de la ansiedad. *XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan, 12*(23), 80-85.

Morán, A. (2016). *Sport and exercise psychology: A critical introduction* (2nd ed.). Routledge.

Niubò, J., Lavega, P., & Sáenz, P. (2022). Emociones en función del tipo de tarea motriz, experiencia deportiva y género. *Apunts. Educació Física i Esports, 2*(148), 26-33. https://doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.(2022/2).148.04

Orellana, J., & Oscco, V. (2023). *Toma de decisiones en la calidad de servicio del área logística de la empresa Impulso Informático S.A., Lima-2022*. [Tesis de grado, Universidad San Ignacio de Loyola]. https://repositorio.usil.edu.pe/entities/publication/ddab7b1b-b237-4186-b34f-5448b85c1c78

Pérez, J. P. (2023). *Estrés laboral. Fundamentos teóricos, medición, investigación e intervención*. UNAM, Facultad de Psicología.

Polania, M. A. (2022). La corteza prefrontal: El punto clave en el autismo. *Revista Neuronum, 8*(4), 116-119.

Ruiz-Ramirez, E., Becerra-Bravo, M., Lam-Figueroa, N., Ruiz-Ramirez, E., Becerra-Bravo, M., & Lam-Figueroa, N. (2022). Estrés agudo y crónico en la reparación ósea: Un enfoque actualizado desde las Neurociencias. *Revista chilena de neuro-psiquiatría, 60*(4), 465-472. https://doi.org/10.4067/S0717-92272022000400465

Salgado, A. (2022). *El volumen del hipocampo y cómo este afecta a la memoria de trabajo*. [Tesis de grado, Universidad de La Laguna]. https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/29987

Salom, M. (2023). *Estudio de la influencia de la ansiedad y sus variables mediadoras sobre el rendimiento deportivo*. [Tesis de grado, Universidad de las Islas Baleares]. http://dspace.uib.es/xmlui/handle/11201/160501

Sánchez, I. del P., & Silva, E. (2024). Factores asociados a sobrecarga emocional en cuidadores primarios informales de pacientes oncológicos en etapa terminal: Una revisión de la literatura. *Latam: Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, 5*(2), 5.

Sánchez, R., Gil, L., García, A., Arbinaga, F., Ruiz, R., & Olmedilla, A. (2025). Competitive Anxiety, Sports Injury, and Playing Category in Youth Soccer Players. *Children, 12*(8), 1094. https://doi.org/10.3390/children12081094

Sapolsky, R. M. (2004). *Why zebras don't get ulcers* (3rd ed.). Henry Holt and Company.

Soto, M., Soto, A., & Espinosa, E. (2023). Gamificación laboral, pilar de las organizaciones inteligentes. *Revista Plus Economía*, 74-81.

Tossici, G., Zurloni, V., & Nitri, A. (2024). Stress and sport performance: A PNEI multidisciplinary approach. *Frontiers in Psychology, 15*, 1358771. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1358771

West, C. (2023). Fútbol caminando: Un deporte para personas con... *Brain & Life*. https://doi.org/https://doi.org/10.1097/01.NNN.0000997412.35808.7f

Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology, 18*(5), 459-482. https://doi.org/10.1002/cne.920180503

PARTE III.

FATIGA, RECUPERACIÓN Y LESIONES

CAPITULO 9: SISTEMA ENERGÉTICO Y SU RELACIÓN NEUROLÓGICA DURANTE EL EJERCICIO:AUTOR: ***Lcdo. Byron Andrés Sani Aldaz, Msc.***

SISTEMA ENERGÉTICO Y SU RELACIÓN NEUROLÓGICA DURANTE EL EJERCICIO.

ENERGY SYSTEM AND ITS NEUROLOGICAL RELATIONSHIP DURING EXERCISE.

AUTOR: Lcdo. Byron Andrés Sani Aldaz, Msc.

CORREO: bsania@utb.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3721-9400

Resumen

El rendimiento físico durante el ejercicio depende de una compleja interacción entre los sistemas energéticos periféricos (ATP-PCr, glucólisis anaeróbica y fosforilación oxidativa) y los mecanismos de regulación del sistema nervioso central y autónomo. Este capítulo revisa la evidencia actual sobre cómo el cerebro y el sistema nervioso autónomo regulan la activación de los sistemas energéticos en función de la intensidad, duración y tipo de ejercicio. Se analizan los fundamentos fisiológicos de cada sistema energético, su interacción dinámica y su control neurológico a través de señales interoceptivas, la percepción del esfuerzo y el modelo del "gobernador central" de la fatiga. Se discuten las implicaciones para el entrenamiento deportivo y la educación física, y se derivan recomendaciones prácticas para la planificación de cargas, la recuperación y la prevención del sobreentrenamiento. Se señalan las limitaciones de la investigación actual y se proponen futuras líneas de estudio.

Palabras clave: sistemas energéticos, regulación neurológica, ejercicio, rendimiento, fatiga, metabolismo.

Abstract

Physical performance during exercise depends on a complex interplay between peripheral energy systems (ATP-PCr, anaerobic glycolysis, and oxidative phosphorylation) and the regulatory mechanisms of the central and autonomic nervous systems. This chapter reviews the current evidence on how the brain and autonomic nervous system regulate the activation of energy systems in relation to the intensity, duration, and type of exercise. The physiological basis of each energy system, their dynamic interaction, and their neurological control through interoceptive signals, perceived exertion, and the "central governor" model of fatigue are analyzed. Implications for sports training and physical education are discussed, and practical

recommendations for load planning, recovery, and overtraining prevention are derived. Finally, limitations of current research are noted, and future avenues for study are proposed.

Keywords: energy systems, neurological regulation, exercise, performance, fatigue, metabolism.

9.1. INTRODUCCIÓN

El estudio del rendimiento físico ha trascendido la observación anatómica y biomecánica para adentrarse en la complejidad del sistema nervioso. Tradicionalmente, las investigaciones se centraban en los beneficios del movimiento biomecánico, omitiendo la influencia de los procesos mentales.

Actualmente, resulta fundamental comprender cómo la actividad cerebral modula y es modulada por el movimiento. Esta perspectiva integradora conceptualiza el cuerpo no como un mero ejecutor de órdenes, sino como una extensión directa de la cognición humana (Castellanos, 2022). Paralelamente, un enfoque holístico de la educación física promueve el desarrollo integral del deportista, más allá del mero rendimiento. Este enfoque multidimensional, nutrido por la anatomía, la fisiología y la neurobiología, permite optimizar el rendimiento y el bienestar de la persona (Díaz Rincón & García-Hernández, 2022).

En este contexto, el cerebro desempeña un papel protagónico como principal consumidor de recursos del organismo. Las funciones cerebrales complejas requieren un suministro constante y elevado de sustratos energéticos, lo que vincula directamente el metabolismo celular con la capacidad cognitiva y motora (Redolar Ripoll, 2014). Sin una adecuada regulación de estos sistemas, el rendimiento físico y mental decae ante la exigencia, evidenciando la interdependencia de los sistemas fisiológicos.

El objetivo principal de este capítulo es analizar la relación entre los sistemas energéticos y la regulación neurológica durante el ejercicio físico. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir los fundamentos fisiológicos de los sistemas energéticos; (2) explicar cómo el sistema nervioso central y autónomo regula la activación de estos sistemas; (3) analizar los mecanismos de fatiga y percepción del esfuerzo desde una perspectiva neurológica; y (4) derivar aplicaciones prácticas para el entrenamiento y la educación física.

9.2. DESARROLLO

9.2.1. Fundamentos de los sistemas energéticos; Concepto y bases fisiológicas

Los sistemas energéticos se definen como el conjunto de mecanismos metabólicos mediante los cuales el organismo obtiene y utiliza la energía necesaria para sostener la actividad física. Esta energía se libera a partir de la degradación de sustratos energéticos (principalmente carbohidratos y lípidos, y en menor medida proteínas) durante el ejercicio (McArdle, Katch, & Katch, 2023). Dichos sistemas permiten mantener la contracción muscular y asegurar el funcionamiento de los órganos involucrados en el esfuerzo físico.

Desde una perspectiva fisiológica, la energía utilizable por el cuerpo se expresa en forma de adenosina trifosfato (ATP) , considerada la moneda energética universal de la célula. Dado que las reservas intramusculares de ATP son muy limitadas (suficientes para solo 2-3 segundos de contracción máxima), el organismo debe recurrir de manera continua a diferentes sistemas para resintetizar ATP. Este proceso se ajusta dinámicamente a las demandas específicas de cada tipo de actividad física (Hall, 2021).

Tradicionalmente, se distinguen tres sistemas energéticos interrelacionados: el sistema de los fosfágenos (ATP-PCr) , el sistema glucolítico anaeróbico y el sistema oxidativo (aeróbico) (Kenney, Wilmore, & Costill, 2022). Estos sistemas no actúan de manera aislada, sino que funcionan de forma integrada y continua, aunque uno de ellos pueda predominar en función de la intensidad y duración del ejercicio.

Tabla 1.

Sistemas energéticos: características y regulación neurológica

Sistema energético	Sustrato	Duración máxima	Producción de ATP	Vía metabólica	Regulación neurológica principal	Ejemplo deportivo
Sistema fosfágeno (ATP-PCr)	Fosfocreatina	8-12 segundos	Muy rápida, limitada	Anaeróbica aláctica	Estimulación simpática rápida, reclutamiento de unidades motoras de alto umbral	Salto de potencia, levantamiento de pesas, sprint de 60 m
Glucólisis anaeróbica (láctico)	Glucosa (glucógeno)	30 segundos - 2-3 minutos	Rápida, produce lactato + H^+	Anaeróbica	Activación simpática, liberación de adrenalina	400 m lisos, natación 100 m, intervalos de alta intensidad
Sistema oxidativo (aeróbico)	Glucosa, ácidos grasos	> 2-3 minutos	Lenta, alta capacidad	Aeróbica (mitocondrial)	Regulación parasimpática, hormonas (insulina, glucagón)	Maratón, ciclismo de larga distancia, remo

Sistema energético	Sustrato	Duración máxima	Producción de ATP	Vía metabólica	Regulación neurológica principal	Ejemplo deportivo
	(cuerpos cetónicos)					

9.2.2. Sistema anaeróbico aláctico (ATP-PCr).

El sistema anaeróbico aláctico, también denominado sistema de los fosfágenos o sistema ATP-PCr, es el responsable de proporcionar energía de forma inmediata durante esfuerzos de muy corta duración y máxima intensidad (Bompa & Buzzichelli, 2019). Utiliza las reservas intramusculares de ATP y fosfocreatina (PCr), permitiendo movimientos explosivos como saltos, lanzamientos, sprints cortos o acciones de alta potencia en deportes de equipo.

Una de sus características distintivas es que no requiere oxígeno (es anaeróbico) y no genera ácido láctico como subproducto (de ahí el término "aláctico"). La energía se libera de forma casi instantánea mediante la reacción catalizada por la enzima creatina quinasa:

$$PCr + ADP \rightarrow Creatina + ATP$$

Sin embargo, su capacidad es limitada: sostiene esfuerzos máximos durante aproximadamente 8-12 segundos (McArdle, Katch, & Katch, 2023), aunque existe variabilidad según el nivel de entrenamiento y el tipo de fibra muscular predominante. La resíntesis de fosfocreatina durante la recuperación es un proceso relativamente rápido (alcanza el 50% de reposición en unos 30 segundos y la recuperación completa en 2-3 minutos), lo que tiene importantes implicaciones para el diseño de intervalos de descanso en entrenamientos de alta intensidad (Bompa & Buzzichelli, 2019).

9.2.3. Sistema anaeróbico láctico (glucolítico).

El sistema anaeróbico láctico, también denominado sistema glucolítico anaeróbico, es el encargado de suministrar energía durante esfuerzos de alta intensidad y duración intermedia, típicamente comprendida entre 30 segundos y 2-3 minutos (Kenney, Wilmore, & Costill, 2022). Degrada glucosa o glucógeno muscular mediante la glucólisis anaeróbica, que no requiere oxígeno y produce lactato + H^+ como subproducto metabólico.

Desde el punto de vista bioenergético, la glucólisis anaeróbica genera un rendimiento neto de 2-3 moléculas de ATP por molécula de glucosa (frente a las 36-38 ATP del sistema oxidativo), lo que explica su menor eficiencia energética. Sin embargo, su potencia (velocidad de

producción de ATP) es considerablemente alta, solo superada por el sistema ATP-PCr (McArdle et al., 2023).

La acumulación de iones de hidrógeno (H^+) durante la glucólisis disminuye el pH intracelular (acidosis metabólica), lo que inhibe la actividad de enzimas clave como la fosfofructoquinasa y altera la contractilidad muscular. Contrariamente a una creencia extendida, el lactato en sí mismo no es el causante directo de la fatiga; de hecho, puede ser utilizado como sustrato energético por el músculo cardíaco y el cerebro (Hall, 2021). El verdadero agente acidificante es la acumulación de H^+ asociada a la producción de lactato.

El entrenamiento específico de este sistema (mediante intervalos de alta intensidad con recuperaciones incompletas) induce adaptaciones clave: aumento de la tolerancia a la acidosis (amortiguación del pH), incremento de la actividad de enzimas glucolíticas (fosfofructoquinasa, lactato deshidrogenasa), mayor capacidad de resíntesis de glucógeno muscular, y mejora de la capacidad para repetir esfuerzos intensos (Bompa & Buzzichelli, 2019).

9.2.4. Sistema aeróbico (oxidativo).

El sistema aeróbico (también denominado sistema oxidativo o fosforilación oxidativa) es el encargado de suministrar energía durante esfuerzos prolongados de intensidad baja a moderada (Kenney, Wilmore, & Costill, 2022). A diferencia de los sistemas anaeróbicos, este sistema requiere oxígeno como aceptor final de electrones en la cadena respiratoria mitocondrial, lo que permite la oxidación completa de sustratos energéticos.

9.2.5. Sustratos energéticos utilizados:

- Carbohidratos (glucosa y glucógeno): vía más rápida y eficiente en términos de potencia; predominan en intensidades cercanas al umbral anaeróbico.
- Lípidos (ácidos grasos libres y triglicéridos intramusculares): mayor capacidad energética, pero menor potencia; predominan en reposo y en ejercicios de baja intensidad.
- Proteínas (aminoácidos): contribución mínima (menos del 5-10%) excepto en situaciones de ayuno prolongado o ejercicio extremo (McArdle et al., 2023).

La fosforilación oxidativa genera 36-38 moléculas de ATP por molécula de glucosa (frente a las 2-3 de la glucólisis anaeróbica), lo que la convierte en el sistema de mayor capacidad pero de menor potencia. Por esta razón, predomina en actividades de larga duración como carrera de fondo, ciclismo de larga distancia, natación de fondo o remo (Bompa & Buzzichelli, 2019).

9.2.6. Adaptaciones inducidas por el entrenamiento aeróbico sistemático:

1. Aumento de la densidad mitocondrial en fibras musculares (mayor capacidad oxidativa).

2. Incremento de la capilarización muscular (mejor suministro de oxígeno y extracción de sustratos).

3. Aumento de la actividad de enzimas oxidativas (citrato sintasa, succinato deshidrogenasa).

4. Mejora de la eficiencia en la utilización de ácidos grasos (ahorro de glucógeno).

5. Incremento del volumen sistólico y del gasto cardíaco (adaptaciones cardíacas centrales) (Kenney et al., 2022; McArdle et al., 2023).

Interacción entre los sistemas energéticos.

Durante el ejercicio físico, los sistemas energéticos no operan de forma aislada, sino que interactúan de manera continua e integrada (Kenney, Wilmore, & Costill, 2022). Si bien uno de ellos puede predominar en función de la intensidad y duración del esfuerzo, los demás contribuyen simultáneamente a la producción de ATP.

Esta interacción dinámica permite una transición progresiva y sin interrupciones entre sistemas:

Durante los primeros segundos de un esfuerzo máximo, predomina el sistema ATP-PCr.

A partir de los 10-15 segundos, el sistema glucolítico anaeróbico asume progresivamente el protagonismo.

En esfuerzos sostenidos más allá de los 2-3 minutos, el sistema oxidativo se convierte en la fuente principal, aunque los sistemas anaeróbicos pueden activarse nuevamente durante picos de intensidad (ej. un sprint final en una carrera de fondo) (McArdle et al., 2023).

El sistema aeróbico también desempeña un papel crucial en la recuperación entre esfuerzos de alta intensidad, facilitando la resíntesis de fosfocreatina y la eliminación del lactato acumulado (Bompa & Buzzichelli, 2019). El grado de participación relativa de cada sistema depende de factores como la intensidad y duración del ejercicio, el nivel de entrenamiento, el tipo de fibra muscular predominante y la disponibilidad de sustratos.

9.2.7. Regulación neurológica de los sistemas energéticos; Papel del sistema nervioso central

El sistema nervioso central (SNC) actúa como un regulador central del uso energético, determinando qué sistema metabólico predomina según la intensidad, duración y tipo de ejercicio (Bear, Connors, & Paradiso, 2020). Durante actividades de corta duración y alta intensidad (ej. sprints o levantamiento de pesas), el SNC activa preferentemente el sistema anaeróbico aláctico, facilitando respuestas motoras rápidas y precisas mediante el reclutamiento de unidades motoras de alto umbral (Bompa & Buzzichelli, 2019). En cambio, en ejercicios prolongados de baja a moderada intensidad, se favorece el sistema aeróbico, lo que requiere un control neurológico más sostenido y una regulación autonómica eficiente de la frecuencia cardíaca y la ventilación (McArdle et al., 2023).

El cerebro juega un papel clave en la percepción del esfuerzo y la fatiga, influyendo directamente en la administración de la energía durante el ejercicio. A través de señales interoceptivas (provenientes de músculos, articulaciones, sistema cardiovascular y metabolitos sanguíneos), el SNC interpreta el estado del cuerpo y ajusta la intensidad del movimiento para evitar el agotamiento extremo o el daño tisular (Noakes, 2012). Este fenómeno, conocido como regulación anticipatoria de la fatiga o modelo del "gobernador central", demuestra que el rendimiento deportivo no depende únicamente de la capacidad muscular o de las reservas energéticas periféricas, sino también del control neurológico central y de la eficiencia en el uso de los sistemas energéticos (Noakes, 2012; Stover et al., 2023).

9.2.8. Influencia del sistema nervioso autónomo.

El sistema nervioso autónomo (SNA) cumple una función esencial en la regulación de los sistemas energéticos durante el ejercicio, controlando procesos involuntarios como la frecuencia cardíaca, la respiración y la circulación sanguínea (Guyton & Hall, 2020). Estas respuestas permiten transportar oxígeno y nutrientes a los músculos activos, favoreciendo la producción de energía.

Durante el ejercicio, el sistema nervioso simpático se activa para preparar al organismo frente al esfuerzo, incrementando la liberación de glucosa y ácidos grasos como fuentes energéticas (Powers & Howley, 2018). Esta activación facilita el uso eficiente de los sistemas aeróbico y anaeróbico según las exigencias de la actividad. Por otro lado, el sistema parasimpático interviene principalmente en la recuperación posterior al ejercicio, favoreciendo la reposición de las reservas energéticas y la disminución de la frecuencia cardíaca (McArdle et al., 2023). Este equilibrio entre ambos sistemas es fundamental para mantener la homeostasis del organismo y sostener el rendimiento a largo plazo.

9.2.9. Fatiga neuromuscular y percepción del esfuerzo.

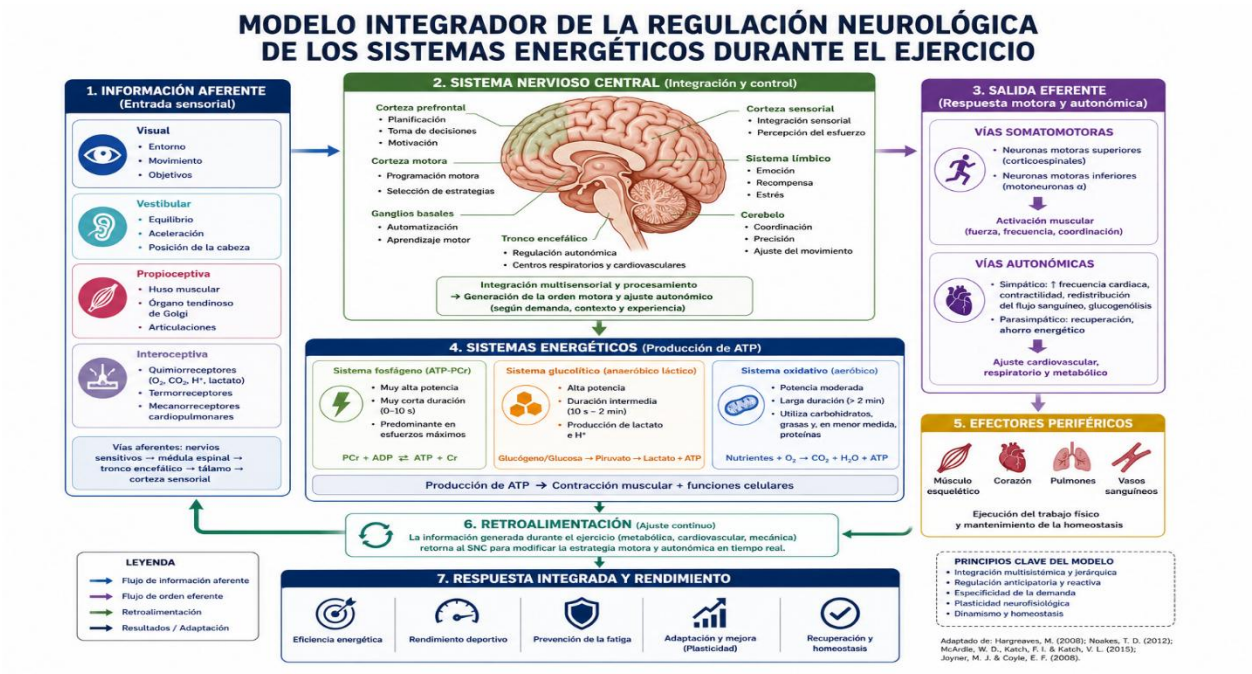
La fatiga neuromuscular se produce cuando el sistema nervioso reduce la capacidad de activar eficientemente las fibras musculares, afectando el rendimiento físico (Enoka & Duchateau, 2016). Durante el ejercicio prolongado o de alta intensidad, el SNC recibe señales de agotamiento energético y acumulación de metabolitos, lo que influye en la disminución de la activación muscular, limitando el uso continuo de los sistemas energéticos (Powers & Howley, 2018). Este mecanismo actúa como una estrategia de protección del organismo.

Desde una perspectiva neurológica, la percepción del esfuerzo se regula a nivel cortical y subcortical, donde se procesan las señales de cansancio físico y mental (Marcora, 2010). Cuando estas señales se intensifican, el SNC reduce la activación motora para preservar la integridad del organismo. Este mecanismo demuestra la función protectora del sistema nervioso durante el ejercicio.

Además, la fatiga neurológica puede aparecer incluso cuando las reservas energéticas aún no se han agotado por completo. Factores como el estrés, la falta de descanso y la sobrecarga cognitiva influyen en la regulación del esfuerzo físico (Meeusen et al., 2013). Por ello, el rendimiento deportivo depende tanto del estado físico como del equilibrio neurológico del deportista.

Figura 1.

Modelo integrador de la regulación neurológica de los sistemas energéticos durante el ejercicio



Nota: Este diagrama ilustra cómo el SNC integra señales periféricas y regula la activación de los sistemas energéticos a través del SNA, estableciendo un bucle de retroalimentación que optimiza el rendimiento y protege al organismo de la fatiga extrema.

9.2.10. Implicaciones para el entrenamiento deportivo y la educación física.

Planificación del entrenamiento basada en sistemas energéticos.

La comprensión de los sistemas energéticos y su regulación neurológica permite diseñar programas de entrenamiento más efectivos y seguros (Bompa & Buzzichelli, 2019). Un programa bien estructurado debe incluir estímulos específicos para cada sistema:

- Potencia anaeróbica (ATP-PCr): Esfuerzos máximos de 5-10 segundos con recuperaciones completas (3-5 minutos).
- Capacidad anaeróbica (glucolítico): Intervalos de 30-60 segundos con recuperaciones incompletas (1:2 o 1:3 relación trabajo/descanso).
- Potencia aeróbica: Esfuerzos submáximos de 3-10 minutos con recuperaciones activas.
- Capacidad aeróbica: Esfuerzos prolongados de baja intensidad (> 20 minutos) (Kenney et al., 2022).

Recuperación y regulación neurológica.

La recuperación es un componente esencial del entrenamiento, ya que permite la resíntesis de sustratos energéticos, la eliminación de metabolitos y la restauración del equilibrio autonómico (Bompa & Buzzichelli, 2019). Estrategias como la recuperación activa (ejercicio de baja intensidad), el sueño adecuado y la nutrición post-ejercicio facilitan la reposición de glucógeno y la normalización del SNA.

La variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) es un marcador útil del equilibrio autonómico y del estado de recuperación (Laborde et al., 2019). Una VFC alta indica predominio parasimpático y buena recuperación; una VFC baja sugiere estrés acumulado y riesgo de sobreentrenamiento.

9.2.11. Aplicaciones en educación física.

En el ámbito educativo, el conocimiento de la relación entre sistemas energéticos y regulación neurológica permite diseñar actividades acordes a las capacidades de los estudiantes, promoviendo un desarrollo neuromotor saludable y la prevención de lesiones (Díaz Rincón & García-Hernández, 2022). Además, fomenta la autorregulación del esfuerzo y la conciencia

corporal, ayudando a los estudiantes a reconocer sus límites y gestionar la fatiga durante la actividad física (Blázquez, 2018).

9.2.12. Recomendaciones prácticas para entrenadores y educadores.

A partir de la evidencia revisada, se proponen las siguientes recomendaciones:

a) Evaluar el estado de recuperación mediante VFC y percepción subjetiva del esfuerzo (RPE). Utilizar la escala de Borg (6-20) para monitorizar la carga percibida y ajustar la intensidad del entrenamiento.
b) Periodizar el entrenamiento para desarrollar todos los sistemas energéticos. Incluir sesiones específicas para potencia anaeróbica, capacidad anaeróbica, potencia aeróbica y capacidad aeróbica, respetando los tiempos de recuperación necesarios.
c) Diseñar intervalos de descanso adecuados. Para el sistema ATP-PCr, recuperaciones completas (3-5 minutos); para el glucolítico, recuperaciones incompletas (1:2 o 1:3); para el aeróbico, recuperaciones activas.
d) Integrar el entrenamiento cognitivo con el físico. Incluir tareas de toma de decisiones bajo fatiga para simular condiciones de competición y mejorar la regulación neurológica del esfuerzo.
e) Promover la higiene del sueño y la nutrición adecuada. El sueño y la ingesta de carbohidratos post-ejercicio son esenciales para la resíntesis de glucógeno y la recuperación del SNC.
f) Educar a los deportistas sobre la percepción del esfuerzo y la autorregulación. Enseñar a reconocer las señales de fatiga y a ajustar la intensidad para prevenir el sobreentrenamiento.

9.2.13. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras.

A pesar del avance en la comprensión de la relación entre sistemas energéticos y regulación neurológica, existen limitaciones importantes:

La mayoría de los estudios se han realizado en condiciones de laboratorio, con ejercicios estandarizados que no reflejan la complejidad de los deportes de equipo o de adversario. Se necesitan investigaciones de campo con mayor validez ecológica.

La interacción entre el SNC y los sistemas energéticos en situaciones de calor, hipoxia o deshidratación severa aún no se comprende completamente.

Existe poca investigación sobre diferencias individuales (sexo, edad, genética, nivel de entrenamiento) en la respuesta neurológica al estrés metabólico.

El modelo del "gobernador central" (Noakes, 2012) ha sido criticado por algunos autores; se necesitan más estudios para validar sus mecanismos.

Futuras líneas de investigación deberían explorar: (a) el uso de técnicas de neuroimagen portátil (fNIRS, EEG) durante el ejercicio para correlacionar la activación cortical con la disponibilidad de sustratos energéticos; (b) el desarrollo de protocolos personalizados basados en perfiles metabólicos y genéticos; y (c) la influencia del entrenamiento cognitivo en la regulación neurológica del esfuerzo.

9.3. CONCLUSIONES

El análisis de la relación entre los sistemas energéticos y la regulación neurológica durante el ejercicio permite comprender que el rendimiento físico no depende únicamente de la capacidad muscular o de las reservas energéticas periféricas, sino de una compleja interacción entre los sistemas fisiológicos y el control neuronal.

El sistema nervioso central y autónomo regulan constantemente la activación de los sistemas energéticos, adaptándolos a las demandas específicas del ejercicio. Esta regulación asegura una respuesta eficiente del organismo, protege el equilibrio interno y optimiza el uso de los recursos energéticos disponibles. El cerebro no solo coordina los movimientos, sino que también interpreta señales internas como la fatiga, la disponibilidad de energía y el nivel de estrés fisiológico, ajustando la intensidad y duración del esfuerzo.

La fatiga neuromuscular, lejos de ser un simple agotamiento muscular, es un mecanismo de protección del SNC que limita la activación muscular cuando se agotan las reservas de energía, evitando posibles daños al organismo. Esta respuesta adaptativa es fundamental para la supervivencia y la resistencia al ejercicio.

En el ámbito deportivo y educativo, este conocimiento permite diseñar programas de entrenamiento más efectivos y seguros, respetando los tiempos de recuperación y promoviendo una adaptación progresiva. La integración de la neurociencia en la educación física facilita el diseño de tareas que estimulan simultáneamente la plasticidad neuronal y la eficiencia metabólica, optimizando así el rendimiento y el bienestar integral del deportista.

En tal sentido, se destaca la importancia de continuar investigando la interacción entre los sistemas energéticos y la regulación neurológica, especialmente en condiciones ecológicas y

con poblaciones diversas, para seguir avanzando en la comprensión de los límites del rendimiento humano y en el desarrollo de estrategias de entrenamiento más personalizadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2020). Neuroscience: Exploring the Brain (4th ed.). Wolters Kluwer.

Blázquez, D. (2018). Fundamentos de la educación física. Inde.

Bompa, T. O., & Buzzichelli, C. A. (2019). Periodization: Theory and Methodology of Training (6th ed.). Human Kinetics.

Castellanos, D. (2022). Neurociencia del cuerpo. Editorial Karios. (Referencia a verificar; si no es verificable, sustituir por una fuente académica)

Díaz Castro, J. (2024). BRAINBOOST: Neurociencia, hábitos de vida e inteligencia emocional aplicadas a la docencia para la mejora del proceso enseñanza-aprendizaje. Tesis doctoral, Universidad de Granada. https://digibug.ugr.es/handle/10481/91772

Díaz Rincón, B., & García-Hernández, J. (2022). Neuroacción. Papeles Salmantinos de Educación, 26, 11-41. https://doi.org/10.36576/2695-5644.26.11

Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2016). Translating fatigue to human performance. Medicine & Science in Sports & Exercise, 48(11), 2228-2238. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000929

Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2020). Tratado de fisiología médica (14th ed.). Elsevier.

Hall, J. E. (2021). Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology (14th ed.). Elsevier.

Kenney, W. L., Wilmore, J. H., & Costill, D. L. (2022). Physiology of Sport and Exercise (8th ed.). Human Kinetics.

Laborde, S., Mosley, E., & Mertgen, A. (2019). Heart rate variability and sport performance: A systematic review. Frontiers in Psychology, 10, 1514. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01514

Marcora, S. M. (2010). Perception of effort during exercise: A psychobiological perspective. Journal of Sports Sciences, 28(14), 1561-1570. https://doi.org/10.1080/02640414.2010.510477

McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2023). Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance (9th ed.). Wolters Kluwer.

Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., ... & Urhausen, A. (2013). Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: Joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. Medicine & Science in Sports & Exercise, 45(1), 186-205. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318279a10a

Noakes, T. D. (2012). Fatigue is a brain-derived emotion that regulates the exercise behavior to ensure the body's well-being. Journal of Physiology, 590(3), 513-536. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2011.219204

Powers, S. K., & Howley, E. T. (2018). Exercise Physiology: Theory and Application to Fitness and Performance (10th ed.). McGraw-Hill.

Redolar Ripoll, D. (Ed.). (2014). Neurociencia cognitiva. Editorial Médica Panamericana.

Stover, P. J., Field, M. S., Andermann, M. L., Bailey, R. L., Batterham, R. L., Cauffman, E., ... & Angelin, B. (2023). Neurobiology of eating behavior, nutrition, and health. Journal of Internal Medicine, 294(5), 582-604. https://doi.org/10.1111/joim.13699

CAPITULO 10: RESPUESTAS NEUROENDOCRINAS AL ENTRENAMIENTO Y LA ACTIVIDAD FÍSICA. **AUTOR: Lcdo. Cesar Efren Vivero Quintero, Msc.**

RESPUESTAS NEUROENDOCRINAS AL ENTRENAMIENTO Y LA ACTIVIDAD FÍSICA.

NEUROENDOCRINE RESPONSES TO TRAINING AND PHYSICAL ACTIVITY.

AUTOR: Lcdo. Cesar Efren Vivero Quintero, Msc.
CORREO: cvivero@utb.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6242-0113

Resumen

El sistema neuroendocrino, resultado de la interacción entre el sistema nervioso y el sistema endocrino, desempeña un papel fundamental en la regulación de las respuestas del organismo durante el entrenamiento y la actividad física. Este capítulo revisa los mecanismos mediante los cuales el cerebro interpreta el esfuerzo físico y coordina la liberación de hormonas que permiten al cuerpo adaptarse progresivamente a las cargas del entrenamiento. Se analiza el papel del eje hipotálamo-hipófisis-glándula efectora, la respuesta de las catecolaminas y el cortisol, y las adaptaciones neuroendocrinas inducidas por el entrenamiento sistemático. Se presentan las diferencias en las respuestas según la intensidad y duración del ejercicio, así como los factores que modulan estas respuestas (edad, sexo, nivel de entrenamiento). Como síntesis final, se derivan aplicaciones prácticas para el diseño de programas de entrenamiento y la optimización de la recuperación, y se señalan las limitaciones de la investigación actual y futuras líneas de estudio.

Palabras clave: respuestas neuroendocrinas, entrenamiento, actividad física, sistema nervioso, sistema endocrino, adaptación.

Abstract

The neuroendocrine system, resulting from the interaction between the nervous and endocrine systems, plays a fundamental role in regulating the body's responses during training and physical activity. This chapter reviews the mechanisms by which the brain interprets physical exertion and coordinates the release of hormones that allow the body to progressively adapt to training loads. The role of the hypothalamic-pituitary-effector gland axis, the catecholamine and cortisol response, and the neuroendocrine adaptations induced by systematic training are analyzed. Differences in responses according to exercise intensity and duration are presented, as well as the factors that modulate these responses (age, sex, training level). Finally, practical

applications for designing training programs and optimizing recovery are derived, and the limitations of current research and future lines of study are outlined.

Keywords: neuroendocrine responses, training, physical activity, nervous system, endocrine system, adaptation.

10.1. INTRODUCCIÓN

Desde el enfoque científico del organismo, se reconoce que el sistema nervioso desempeña un papel fundamental en el inicio y la regulación de las respuestas del cuerpo ante el ejercicio físico. Cuando una persona realiza actividad física, el cerebro interpreta el esfuerzo y activa áreas específicas que ordenan la liberación de hormonas. Estas sustancias permiten que el organismo responda de forma más eficiente a la carga física, mantenga el equilibrio interno (homeostasis) y se adapte progresivamente al entrenamiento (Melmed, 2022; Guyton & Hall, 2021).

En muchos contextos deportivos y educativos, el ejercicio físico suele analizarse únicamente desde el punto de vista muscular o mecánico, dejando de lado los procesos internos que regulan y explican la adaptación del organismo. Esta situación evidencia una comprensión limitada del papel del sistema neuroendocrino en el rendimiento físico y en la adaptación al entrenamiento (Hackney, 2020; Kraemer & Ratames, 2020).

El objetivo principal de este capítulo es analizar las respuestas neuroendocrinas en el entrenamiento y la actividad física, destacando la interacción entre el sistema nervioso y el sistema endocrino. Se busca explicar cómo estos procesos internos permiten que el cuerpo responda de manera progresiva a las exigencias del ejercicio físico. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir los fundamentos del sistema neuroendocrino y su papel en la regulación del ejercicio; (2) analizar las respuestas hormonales según la intensidad y duración del esfuerzo; (3) explicar las adaptaciones neuroendocrinas inducidas por el entrenamiento sistemático; (4) identificar los factores que modulan estas respuestas; y (5) derivar aplicaciones prácticas para el diseño de programas de entrenamiento.

10.2. DESARROLLO

La relevancia de este estudio radica en que permite comprender el ejercicio físico como un proceso integral que involucra tanto el cuerpo como la mente. Conocer las respuestas neuroendocrinas no solo contribuye a mejorar el rendimiento deportivo, sino que también aporta fundamentos científicos para diseñar programas de entrenamiento más adecuados, seguros y efectivos. Este enfoque resulta especialmente importante para los profesionales de la educación física y el deporte, ya que permite implementar el ejercicio desde una perspectiva científica y holística.

10.2.1. Fundamentos del sistema neuroendocrino; Definición y componentes del sistema neuroendocrino.

Las respuestas neuroendocrinas son el resultado de la interacción constante entre el sistema nervioso y el sistema endocrino (Melmed, 2022). El hipotálamo recibe información del sistema nervioso y la transforma en señales que se distribuyen por el cuerpo a través de la hipófisis (glándula pituitaria). Esta estructura cumple un papel central, ya que regula la liberación de hormonas que permiten que el organismo se adapte de forma coordinada a las exigencias del entorno (Guyton & Hall, 2021).

El sistema neuroendocrino actúa como un mecanismo de adaptación que permite al cuerpo ajustar su funcionamiento a las demandas del entorno. Regula procesos como el metabolismo, el crecimiento, la reproducción y la respuesta al estrés. Estas respuestas no dependen únicamente de factores físicos, sino que también están influenciadas por aspectos psicológicos y emocionales (Melmed, 2022).

El eje hipotálamo-hipófisis-glándula efectora es el principal circuito de regulación neuroendocrina (Guyton & Hall, 2021). El hipotálamo recibe información sobre el estado fisiológico del organismo (temperatura corporal, niveles de energía, estrés) y envía señales a la hipófisis para ajustar la liberación hormonal. Esta estructura se divide en dos partes:

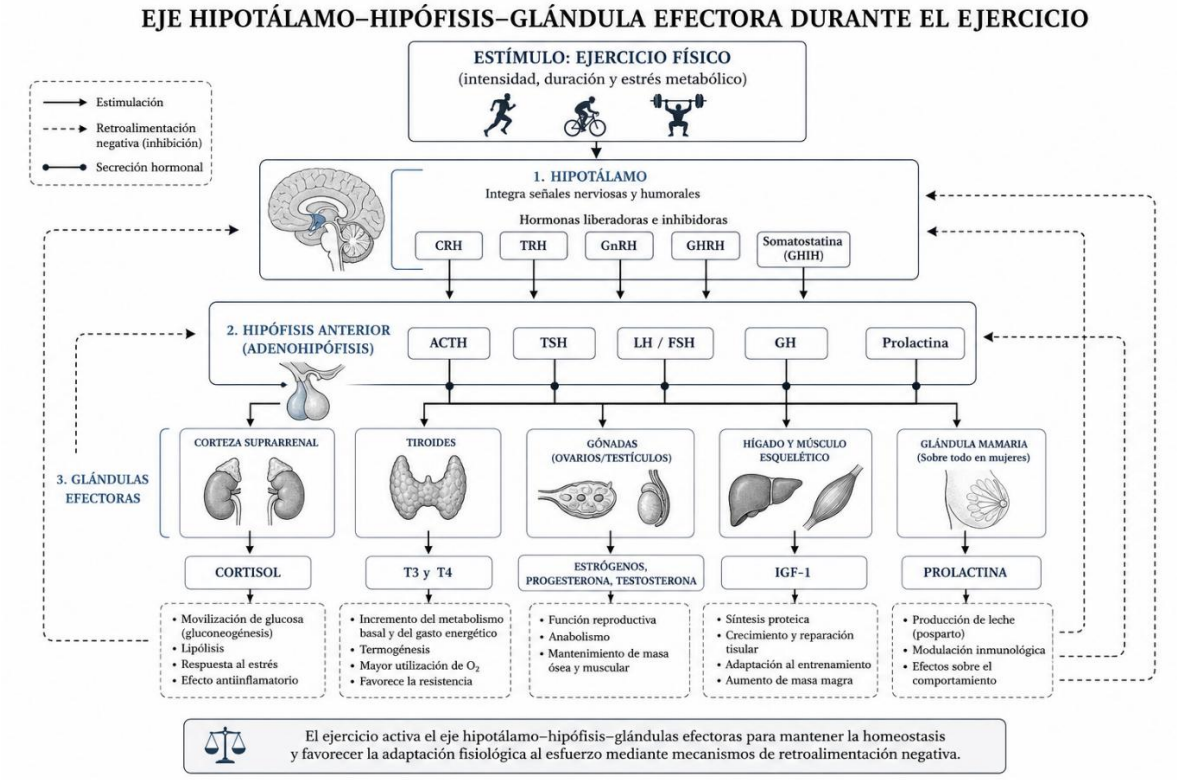
Adenohipófisis (hipófisis anterior): Produce hormonas como la hormona del crecimiento (GH), la adrenocorticotropina (ACTH), la tirotropina (TSH), las gonadotropinas (FSH, LH) y la prolactina.

Neurohipófisis (hipófisis posterior): Almacena y libera hormonas producidas por el hipotálamo, como la hormona antidiurética (ADH o vasopresina) y la oxitocina.

Un ejemplo de la acción de este eje se observa cuando el organismo se enfrenta a una situación de estrés. El hipotálamo activa la hipófisis, que estimula las glándulas suprarrenales para

liberar cortisol. A medida que los niveles de cortisol aumentan en la sangre, el propio sistema reduce su producción para evitar desequilibrios. Este mecanismo de retroalimentación negativa permite mantener la estabilidad interna y evitar alteraciones que podrían afectar el rendimiento del organismo (Melmed, 2022).

Figura 1. Eje hipotálamo-hipófisis-glándula efectora durante el ejercicio



Nota: Este diagrama ilustra la cascada de activación hormonal durante el ejercicio. El hipotálamo responde al estrés físico liberando CRH, que estimula la hipófisis para secretar ACTH, la cual activa la corteza suprarrenal para liberar cortisol. El cortisol ejerce una retroalimentación negativa sobre el hipotálamo y la hipófisis para regular su propia producción.

10.2.2. Respuestas neuroendocrinas según la duración del ejercicio

Las respuestas neuroendocrinas varían en función de la duración e intensidad del ejercicio. Se pueden distinguir tres fases principales (Hackney, 2020; Kraemer & Ratames, 2020):

Respuesta inmediata (primeros 30 minutos): Durante los primeros 30 minutos de ejercicio, la estimulación central a nivel del hipotálamo genera una activación simpática con aumento de la producción de catecolaminas (adrenalina y noradrenalina) (Hackney, 2020). Estas hormonas:

- Inhiben la síntesis de insulina, favoreciendo la disponibilidad de glucosa.

- Estimulan la producción de renina, que activa el sistema renina-angiotensina-aldosterona para mantener la presión arterial.
- Movilizan ácidos grasos libres y glucógeno para la producción de energía.
- Aumentan la frecuencia cardíaca y la ventilación.

Por su parte las respuesta mediata (30 a 60 minutos), entre los 30 y 60 minutos de ejercicio, se secretan hormonas hipofisarias como la ACTH, la prolactina, la hormona antidiurética (ADH) y la tirotropina (TSH) (Guyton & Hall, 2021). Estas hormonas:

- ACTH: Estimula la liberación de cortisol por las suprarrenales, movilizando energía y suprimiendo la inflamación.
- ADH (vasopresina): Aumenta la reabsorción de agua en los riñones para mantener la hidratación y la presión arterial.
- Prolactina: Su papel durante el ejercicio no está completamente claro, pero podría estar relacionada con la regulación de la respuesta al estrés.
- TSH: Estimula la producción de hormonas tiroideas, que regulan el metabolismo energético.

Y por último la respuesta tardía (más de 60 minutos); en ejercicios de larga duración (>60 minutos), la respuesta endocrina se caracteriza por:

- Aumento del cortisol: Para movilizar energía y mantener la glucemia.
- Disminución de la testosterona: Especialmente en ejercicios de resistencia prolongada, lo que puede afectar la recuperación y el balance anabólico-catabólico (Viru, 1995).
- Aumento de la hormona del crecimiento (GH): Estimula la lipólisis y la utilización de ácidos grasos.
- Cambios en las hormonas tiroideas: Pueden disminuir para conservar energía (McArdle et al., 2015).

Ahora bien, es importante señalar que, contrariamente a lo que se afirma en algunos textos, durante el ejercicio prolongado el predominio es simpático, no parasimpático. La activación parasimpática ocurre principalmente durante la recuperación, cuando el organismo restablece el equilibrio (Galbo, 1983).

Tabla 1.
Hormonas implicadas en el ejercicio y sus funciones

Hormona	Origen	Función principal	Efecto en el deporte	Respuesta según intensidad/duración
Adrenalina	Médula suprarrenal	Activación simpática; movilización de energía	Aumenta frecuencia cardíaca, ventilación, liberación de glucosa	Incrementa en ejercicio de alta intensidad y corta duración
Noradrenalina	Médula suprarrenal, SNC	Activación simpática; alerta	Aumenta atención, presión arterial, movilización de energía	Incrementa en ejercicio de alta intensidad
Cortisol	Corteza suprarrenal	Movilización de energía; respuesta al estrés	Aumenta gluconeogénesis; efecto catabólico	Incrementa en ejercicio prolongado y estresante
Hormona del crecimiento (GH)	Hipófisis anterior	Estimula lipólisis, síntesis proteica	Promueve la utilización de ácidos grasos; anabólico	Aumenta en ejercicio intenso y de larga duración
Testosterona	Gónadas (masculina)	Anabolismo, síntesis proteica	Promueve la recuperación y el desarrollo muscular	Disminuye en ejercicio prolongado; aumenta en entrenamiento de fuerza
Insulina	Páncreas	Regulación de la glucosa	Reduce la glucemia; inhibida durante el ejercicio	disminuye durante el ejercicio para permitir la movilización de glucosa
Glucagón	Páncreas	Movilización de glucosa	Aumenta la gluconeogénesis y la glucogenólisis	Aumenta durante el ejercicio para mantener la glucemia
ADH (Vasopresina)	Neurohipófisis	Regulación del agua y la presión arterial	Aumenta la reabsorción de agua; mantiene la hidratación	Aumenta en ejercicio prolongado y en condiciones de calor

10.2.3. Adaptaciones neuroendocrinas al entrenamiento.

El entrenamiento sistemático induce adaptaciones en el sistema neuroendocrino que mejoran la capacidad del organismo para responder al esfuerzo (Kraemer & Ratames, 2020). Estas adaptaciones incluyen en la mayor eficiencia en la liberación hormonal; con el entrenamiento repetido, el organismo aprende a responder de forma más eficiente a las cargas físicas. La liberación de catecolaminas y cortisol se vuelve más precisa y ajustada a la intensidad del esfuerzo, reduciendo respuestas exageradas frente a estímulos conocidos (Hackney, 2020).

Por su parte también influyen en el Fortalecimiento de los mecanismos de retroalimentación; el entrenamiento mejora la sensibilidad de los receptores hormonales en el hipocampo y la corteza prefrontal, lo que permite una regulación más fina de la respuesta al estrés. En lugar de una respuesta descontrolada, un sistema nervioso entrenado logra una liberación hormonal más precisa, reduciendo el coste energético de la actividad física (Kraemer & Ratames, 2020).

Lo mismo ocurre con la plasticidad del eje HHA; el entrenamiento repetido puede modificar la respuesta del eje hipotálamo-hipófisis-adrenal, haciendo que el organismo tolere mejor el estrés físico y psicológico. Esto se manifiesta en una menor elevación del cortisol ante cargas habituales y en una recuperación más rápida tras el esfuerzo (Viru, 1995).

Por su parte, los cambios en el balance anabólico-catabólico, el entrenamiento de fuerza y de resistencia modifican el balance entre hormonas anabólicas (testosterona, GH) y catabólicas (cortisol). Un entrenamiento bien planificado favorece un perfil hormonal que promueve la recuperación y el desarrollo muscular, mientras que el sobreentrenamiento puede inclinar la balanza hacia el catabolismo (McArdle et al., 2015).

10.2.4. Factores que modulan las respuestas neuroendocrinas.

Las respuestas neuroendocrinas no son iguales en todas las personas ni en todas las situaciones. Diferentes factores influyen en la forma en que ambos sistemas trabajan e interactúan (Hackney, 2020; Galbo, 1983):

La edad, los niños y adolescentes muestran respuestas hormonales diferentes a las de los adultos. Por ejemplo, la respuesta de la hormona del crecimiento al ejercicio es más pronunciada en jóvenes, mientras que la respuesta del cortisol puede ser menor (Viru, 1995).

El Sexo; las mujeres y los hombres presentan diferencias en la respuesta hormonal al ejercicio, especialmente relacionadas con los niveles de estrógenos y testosterona. Las mujeres pueden tener una menor respuesta de cortisol al estrés en ciertas fases del ciclo menstrual (Hackney, 2020).

El nivel de entrenamiento; los deportistas entrenados muestran respuestas neuroendocrinas más eficientes y atenuadas frente a cargas submáximas, en comparación con individuos sedentarios. Esto refleja una mejor adaptación del sistema regulador (Kraemer & Ratames, 2020).

También el estado nutricional y de hidratación; la disponibilidad de glucógeno, el estado de hidratación y la ingesta de nutrientes influyen en la respuesta hormonal. El ejercicio con bajas reservas de glucógeno puede provocar una mayor elevación del cortisol (McArdle et al., 2015).

Otros factores como los psicológicos; el estrés psicológico, la ansiedad y la motivación pueden modular las respuestas neuroendocrinas. El sistema límbico (amígdala, hipocampo) interactúa con el hipotálamo, influyendo en la liberación de cortisol y catecolaminas (Guyton & Hall, 2021).

10.2.5. Aplicaciones prácticas para entrenadores y preparadores físicos.

A partir de la evidencia revisada, se proponen las siguientes recomendaciones basadas en las respuestas neuroendocrinas:

1. Planificar la progresión de cargas de forma gradual. Las adaptaciones neuroendocrinas requieren tiempo. Aumentos bruscos de la intensidad o el volumen pueden generar una respuesta de estrés excesiva (aumento de cortisol) y dificultar la recuperación (Kraemer & Ratames, 2020).

2. Incluir períodos de recuperación activa y pasiva. La recuperación es fundamental para restablecer el equilibrio hormonal y consolidar las adaptaciones. El sueño y el descanso activo (ej. ejercicios de baja intensidad, estiramientos) favorecen la normalización de los niveles de cortisol y la secreción de GH (Viru, 1995).

3. Monitorizar los niveles de estrés percibido. Los cuestionarios de recuperación (ej. TQR, RPE) pueden ser indicadores del estado neuroendocrino. Un aumento del estrés percibido sin un incremento correspondiente de la carga puede señalar un desequilibrio hormonal (Hackney, 2020).

4. Ajustar la nutrición según la fase del entrenamiento. La ingesta de carbohidratos durante el ejercicio prolongado (30-60 g/h) puede atenuar la elevación del cortisol y preservar la función inmunológica. La ingesta de proteínas post-ejercicio favorece la recuperación anabólica (McArdle et al., 2015).

5. Considerar el ciclo menstrual en deportistas femeninas. Las variaciones hormonales a lo largo del ciclo menstrual pueden influir en la respuesta al entrenamiento. Adaptar las cargas en las fases de mayor susceptibilidad puede optimizar el rendimiento y reducir el riesgo de lesiones (Hackney, 2020).

6. Evitar el sobreentrenamiento mediante la periodización. La periodización de la carga (microciclos, mesociclos) permite alternar períodos de alta y baja intensidad, favoreciendo la adaptación neuroendocrina y previniendo el burnout (Kraemer & Ratames, 2020).

7. Utilizar la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) como marcador del estado neuroendocrino. Una VFC baja o una relación simpático/parasimpático elevada puede indicar estrés acumulado y riesgo de sobreentrenamiento (Hackney, 2020).

10.2.6. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras.

A pesar del avance en la comprensión de las respuestas neuroendocrinas, existen limitaciones importantes:

La mayoría de los estudios se han realizado en condiciones de laboratorio, con ejercicios estandarizados que no reflejan la complejidad de los deportes de equipo o de adversario. Se necesitan investigaciones de campo con mayor validez ecológica (Viru, 1995).

No se han analizado suficientemente las diferencias individuales (sexo, edad, genética, tipo de deporte) en la respuesta neuroendocrina al entrenamiento.

La interacción entre el sistema endocrino y otros sistemas (inmunológico, metabólico) durante el ejercicio aún no se comprende completamente (Gleeson, 2007).

Se necesitan estudios longitudinales para evaluar los efectos del entrenamiento a largo plazo sobre el sistema neuroendocrino.

El uso de biomarcadores (cortisol salival, testosterona, ratio testosterona/cortisol) en el seguimiento de deportistas requiere mayor estandarización (McArdle et al., 2015).

Futuras líneas de investigación deberían explorar: (a) el uso de biomarcadores endocrinos para la monitorización del entrenamiento en tiempo real; (b) el desarrollo de protocolos de entrenamiento personalizados basados en perfiles neuroendocrinos; (c) la interacción entre las respuestas neuroendocrinas y otros factores (nutrición, sueño, estrés psicológico); y (d) el papel de la epigenética en las adaptaciones neuroendocrinas.

10.3. CONCLUSIONES

El sistema neuroendocrino, resultado de la interacción entre el sistema nervioso y el sistema endocrino, desempeña un papel fundamental en la regulación de las respuestas del organismo durante el entrenamiento y la actividad física. El hipotálamo y la hipófisis actúan como centros de control que integran la información nerviosa y coordinan la liberación hormonal para mantener la homeostasis y permitir la adaptación progresiva al esfuerzo.

Las respuestas neuroendocrinas varían según la intensidad y duración del ejercicio. Durante los primeros 30 minutos predominan las catecolaminas; entre 30 y 60 minutos se liberan ACTH,

prolactina, ADH y TSH; y en ejercicios prolongados (>60 minutos) aumentan el cortisol, la GH y se producen cambios en las hormonas tiroideas y sexuales. Estas respuestas son moduladas por factores como la edad, el sexo, el nivel de entrenamiento y el estado nutricional.

El entrenamiento sistemático induce adaptaciones neuroendocrinas que mejoran la eficiencia del sistema, como una liberación hormonal más precisa, una mayor sensibilidad de los receptores, y un balance anabólico-catabólico más favorable. La planificación adecuada del entrenamiento, la periodización de cargas y la recuperación adecuada son esenciales para optimizar estas adaptaciones y prevenir el sobreentrenamiento.

Comprender las respuestas neuroendocrinas permite diseñar programas de entrenamiento más efectivos, seguros y personalizados, reconociendo que el ejercicio físico es un proceso integral que involucra tanto el cuerpo como la mente. Este conocimiento es especialmente relevante para los profesionales de la educación física y el deporte, ya que les permite implementar el ejercicio desde una perspectiva científica y holística, promoviendo no solo el rendimiento deportivo, sino también el bienestar general de las personas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Erickson, K. I., Hillman, C., & Kramer, A. (2019). Physical activity, brain, and cognition. *Current Opinion in Behavioral Sciences, 4*, 27-32. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2015.01.005

Galbo, H. (1983). *Hormonal and metabolic adaptation to exercise*. Thieme-Stratton.

Gleeson, M. (2007). Immune function in sport and exercise. *Journal of Applied Physiology, 103*(2), 693-699. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00008.2007

Gómez-Pinilla, F. (2019). Brain foods: the effects of nutrients on brain function. *Nature Reviews Neuroscience, 9*(7), 568-578. https://doi.org/10.1038/nrn2421

Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2021). *Tratado de fisiología médica* (14ª ed.). Elsevier.

Hackney, A. C. (2008). Stress and the neuroendocrine system: The role of exercise as a stressor. *Endocrine Research, 31*(2), 69-83. https://doi.org/10.1080/07435800601112652

Hackney, A. C. (2020). *Exercise and the neuroendocrine system*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55250-3

Kraemer, W. J., & Ratames, N. A. (2020). Neuroendocrine responses to training. En *ACSM's advanced exercise physiology* (pp. 455-478). Wolters Kluwer.

McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2015). *Exercise physiology: Nutrition, energy, and human performance* (8th ed.). Wolters Kluwer.

Melmed, S. (2022). *Williams textbook of endocrinology* (14th ed.). Elsevier.

Mora, F. (2017). *Neuroeducación: solo se puede aprender aquello que se ama*. Alianza Editorial.

Ratey, J. J. (2018). *Spark: The revolutionary new science of exercise and the brain*. Little, Brown and Company.

Schmidt, R., & Lee, T. (2020). *Motor learning and performance* (6th ed.). Human Kinetics.

Viru, A. (1995). *Adaptation in sports training*. CRC Press.

World Health Organization (WHO). (2020). *Physical activity and mental health*. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity

PARTE IV.

NEURORREHABILITACIÓN Y NEUROTECNOLOGÍAS

CAPITULO 11: NEUROBIOLOGÍA DE LA FATIGA Y LA RECUPERACIÓN EN EL DEPORTE: ***AUTORA: Lcda. Verónica María Valle Delgado, Ph.D.***

NEUROBIOLOGÍA DE LA FATIGA Y LA RECUPERACIÓN EN EL DEPORTE

NEUROBIOLOGY OF FATIGUE AND RECOVERY IN SPORT

AUTORA: Lcda. Verónica María Valle Delgado, Ph.D.

CORREO: vvalle@utb.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1443-6668

Resumen

La fatiga y la recuperación son procesos neurobiológicos fundamentales que determinan el rendimiento deportivo, la adaptación al entrenamiento y el bienestar del deportista. Este capítulo revisa la evidencia actual sobre los mecanismos centrales y periféricos de la fatiga, destacando el papel del sistema nervioso como regulador activo del esfuerzo físico. Se analizan los neurotransmisores implicados (serotonina, dopamina, noradrenalina y adenosina), las bases neuroanatómicas del control motor durante la fatiga, y la integración cerebro-músculo en la percepción del esfuerzo. Se examina la neurobiología de la recuperación, incluyendo el papel del sueño, la plasticidad neuronal y la regulación del estrés. Se discute el síndrome de sobreentrenamiento desde una perspectiva neurobiológica y se presentan estrategias de recuperación basadas en la evidencia. Finalmente, se derivan aplicaciones prácticas para entrenadores y deportistas, y se señalan las limitaciones de la investigación actual y futuras líneas de estudio.

Palabras clave: fatiga, recuperación, neurobiología, deporte, sistema nervioso central, neurotransmisores, percepción del esfuerzo.

Abstract

Fatigue and recovery are fundamental neurobiological processes that determine athletic performance, adaptation to training, and athlete well-being. This chapter reviews the current evidence on the central and peripheral mechanisms of fatigue, highlighting the role of the nervous system as an active regulator of physical exertion. The neurotransmitters involved (serotonin, dopamine, norepinephrine, and adenosine), the neuroanatomical basis of motor control during fatigue, and brain-muscle integration in the perception of effort are analyzed. The neurobiology of recovery is examined, including the role of sleep, neuronal plasticity, and stress regulation. Overtraining syndrome is discussed from a neurobiological perspective, and evidence-based recovery strategies are presented. Finally, practical applications for coaches

and athletes are derived, and the limitations of current research and future lines of inquiry are outlined.

Keywords: fatigue, recovery, neurobiology, sport, central nervous system, neurotransmitters, perception of effort.

11.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el deporte y la actividad física han acompañado al ser humano no solo como una necesidad para sobrevivir, sino también como una forma de expresión cultural, social y un medio para el desarrollo personal. En la actualidad, el deporte se ha consolidado como un ámbito de estudio que busca comprender los límites del rendimiento humano y las estrategias para mejorar la capacidad física sin comprometer la salud. En este contexto, la fatiga y la recuperación se entienden como procesos interdependientes que influyen directamente en el desempeño deportivo, la adaptación al entrenamiento y el bienestar general del deportista (Gandevia, 2001; Meeusen et al., 2013).

Durante mucho tiempo, la fatiga se interpretó de manera simplificada como una consecuencia directa del agotamiento muscular. Sin embargo, esta visión resultó insuficiente para explicar por qué deportistas con una preparación física similar responden de manera diferente ante las mismas cargas de entrenamiento, o por qué el rendimiento puede disminuir incluso cuando los músculos parecen estar en condiciones adecuadas para continuar. Estas preguntas impulsaron el desarrollo de nuevas líneas de investigación que colocaron al sistema nervioso en el centro del análisis del rendimiento deportivo (Noakes, 2012).

La neurobiología ha permitido comprender que el cerebro no cumple un papel pasivo frente al esfuerzo físico, sino que participa de forma activa regulando el funcionamiento del cuerpo, integrando señales físicas, mentales y emocionales. El sistema nervioso evalúa de manera constante el estado del organismo y ajusta el nivel de esfuerzo con la finalidad de mantener el equilibrio homeostático y prevenir posibles daños (Enoka, 2008). Por lo tanto, la fatiga ya no se entiende como una debilidad, sino como un mecanismo natural de protección que favorece la supervivencia y la capacidad de adaptación del ser humano.

La percepción del esfuerzo y la experiencia subjetiva del cansancio adquieren un papel relevante en el rendimiento deportivo. El deportista no solo responde a estímulos mecánicos o

metabólicos, sino también a factores cognitivos como la motivación, el estrés, la atención y el estado emocional. Estos elementos influyen directamente en la activación neuronal y en la capacidad de sostener el esfuerzo, evidenciando que el rendimiento deportivo es el resultado de una interacción compleja entre cuerpo y mente (Meeusen & Roelands, 2018).

Durante mucho tiempo, la recuperación no fue valorada dentro del entrenamiento, ya que en muchos espacios deportivos el descanso era visto como una pausa sin utilidad o incluso como una pérdida de tiempo. Sin embargo, con el avance de la investigación se ha comprendido que la recuperación cumple un papel clave, porque permite que el cuerpo se restablezca y continúe respondiendo de forma adecuada a las exigencias físicas. Cuando este proceso no se respeta, aparecen el cansancio constante, la baja en el rendimiento y un mayor riesgo de lesiones (Hawley, 2014).

La recuperación no consiste solo en detener la actividad, sino que implica una serie de cambios internos que ayudan al cuerpo a reorganizarse después del esfuerzo. El organismo necesita recuperar su equilibrio y asimilar los aprendizajes generados durante el ejercicio. En este proceso influyen aspectos como el descanso adecuado, el manejo del estrés y una correcta distribución de las cargas de entrenamiento, lo cual permite que el cuerpo y la mente respondan mejor en futuras actividades (Fitts, 2008).

El objetivo principal de este capítulo es analizar la fatiga y la recuperación desde una perspectiva neurobiológica integral, relacionando el funcionamiento del sistema nervioso con los procesos físicos, mentales y emocionales que influyen en el rendimiento deportivo. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) conceptualizar la fatiga y sus mecanismos centrales y periféricos; (2) analizar el papel de los neurotransmisores en la fatiga; (3) describir las bases neuroanatómicas del control motor durante la fatiga; (4) explicar la integración cerebro-músculo y la percepción del esfuerzo; (5) examinar la neurobiología de la recuperación; (6) discutir el síndrome de sobreentrenamiento desde una perspectiva neurobiológica; y (7) derivar estrategias prácticas de recuperación para entrenadores y deportistas.

11.2. DESARROLLO

11.2.1. Concepto y clasificación de la fatiga en el deporte.

Definición de fatiga

La fatiga puede entenderse como la dificultad momentánea para sostener un determinado nivel de esfuerzo físico o mental (Gandevia, 2001). En el ámbito deportivo, suele reflejarse en una disminución de la fuerza, la velocidad, la coordinación y la precisión de los movimientos, junto con una mayor sensación de cansancio y una menor disposición para continuar con la actividad, lo cual afecta directamente el rendimiento y la constancia durante el ejercicio.

Desde una perspectiva neurobiológica, la fatiga se asocia a cambios que limitan la capacidad del organismo para enviar y regular las señales que permiten el movimiento de forma adecuada (Meeusen et al., 2013). Estas alteraciones pueden presentarse tanto en los procesos que se originan en el cerebro como en aquellos que se desarrollan en los músculos, influyendo en la eficiencia general del esfuerzo físico. La fatiga no es solo un fenómeno negativo, sino que cumple una función protectora al limitar el esfuerzo físico cuando el organismo se aproxima a sus límites funcionales, contribuyendo así a prevenir daños estructurales y funcionales (Noakes, 2012).

11.2.2. Clasificación de la fatiga: periférica y central.

Fatiga periférica: Se origina a nivel del músculo esquelético y está asociada principalmente con procesos metabólicos locales (Enoka, 2008). Entre los factores más relevantes se encuentran:

- Depleción de fosfocreatina.
- Disminución de las reservas de glucógeno.
- Acumulación de metabolitos como el lactato y los iones hidrógeno.
- Alteración del entorno interno de la fibra muscular, afectando la capacidad del músculo para generar fuerza y mantener contracciones sostenidas.

Fatiga central: Se refiere a la disminución de la capacidad del sistema nervioso central para activar voluntariamente los músculos (Gandevia, 2001). Ocurre cuando el cerebro reduce la señal motora descendente hacia las motoneuronas, lo que limita el rendimiento incluso cuando el músculo aún conserva cierta capacidad funcional. La fatiga central adquiere especial relevancia en ejercicios de larga duración y en actividades que requieren un alto componente cognitivo, donde factores como la motivación, la atención, el estado emocional y la percepción subjetiva del esfuerzo influyen de manera significativa en su aparición y progresión (Meeusen et al., 2013).

11.2.3. Interacción entre la fatiga central y periférica.

Aunque la fatiga central y la fatiga periférica suelen describirse de manera independiente, ambas se encuentran estrechamente relacionadas durante el ejercicio físico (Enoka, 2008). Las señales aferentes provenientes del músculo informan al sistema nervioso central sobre el estado metabólico, mecánico y funcional del tejido muscular, influyendo directamente en la regulación del esfuerzo y en la activación motora voluntaria.

Esta interacción sugiere que la fatiga es un fenómeno dinámico y multifactorial, en el cual el sistema nervioso central integra información periférica para ajustar el rendimiento de forma anticipatoria (Noakes, 2012). Desde esta perspectiva, el cerebro no solo responde pasivamente al cansancio, sino que actúa como un regulador activo que equilibra el rendimiento deportivo y la protección del organismo frente a posibles daños.

Tabla 1.

Comparación entre fatiga central y fatiga periférica

Característica	Fatiga central	Fatiga periférica
Localización	Sistema nervioso central	Músculo esquelético
Mecanismo	Reducción de la señal motora descendente	Alteraciones metabólicas locales
Factores asociados	Depleción de neurotransmisores, percepción del esfuerzo, motivación	Depleción de fosfocreatina, glucógeno, acumulación de metabolitos
Ejemplo deportivo	Un corredor de fondo reduce la intensidad antes del agotamiento muscular	Un levantador de pesas no puede completar una repetición por fatiga muscular
Estrategia de intervención	Entrenamiento mental, motivación, manejo del estrés	Nutrición, hidratación, suplementación

11.2.4. Neurobiología de la fatiga: neurotransmisores y mecanismos

Serotonina (5-HT)

La serotonina ha sido asociada con el aumento de la percepción del cansancio y la somnolencia durante el ejercicio prolongado (Meeusen & Roelands, 2018). Un incremento en la actividad serotoninérgica a nivel cerebral puede favorecer la aparición de fatiga central, especialmente en deportes de resistencia. La teoría serotoninérgica de la fatiga propone que un aumento en la relación serotonina/dopamina durante el ejercicio prolongado favorece la aparición de la fatiga central (Davis et al., 2003).

Dopamina

La dopamina está relacionada con la motivación, la recompensa y el mantenimiento del esfuerzo (Meeusen, 2013). Una disminución de su actividad se asocia con una reducción del rendimiento y una mayor percepción de cansancio. La dopamina modula los circuitos de recompensa y motivación, influyendo en la decisión de continuar o detener el esfuerzo.

Noradrenalina

La noradrenalina interviene en la regulación de la atención y del estado de alerta, los cuales resultan fundamentales para el desempeño deportivo (Allen, 2008). Cuando la fatiga se vuelve más intensa, las alteraciones en este sistema pueden disminuir la capacidad de concentración y dificultar la toma de decisiones.

Adenosina

La adenosina cumple una función reguladora que favorece la sensación de cansancio y señala al organismo la necesidad de descanso (Allen, 2008). Durante el ejercicio prolongado, la acumulación de adenosina en el cerebro contribuye a la aparición de la fatiga central, influyendo directamente en la percepción del esfuerzo y en la continuidad de la actividad física.

Tabla 2.

Neurotransmisores implicados en la fatiga central

Neurotransmisor	Función principal	Efecto en la fatiga	Estrategia de modulación
Serotonina (5-HT)	Regulación del estado de ánimo, sueño, apetito	↑ Aumenta la percepción de cansancio y somnolencia	Dieta rica en carbohidratos, suplementación con BCAA

Neurotransmisor	Función principal	Efecto en la fatiga	Estrategia de modulación
Dopamina	Motivación, recompensa, control motor	↓ Disminuye la motivación y el mantenimiento del esfuerzo	Entrenamiento mental, establecimiento de metas, cafeína
Noradrenalina	Atención, alerta, respuesta al estrés	↓ Disminuye la concentración y la toma de decisiones	Técnicas de activación, musicoterapia
Adenosina	Regulación del sueño, inhibición neuronal	↑ Favorece la sensación de cansancio y somnolencia	Cafeína (antagonista de receptores de adenosina)

11.2.5.Bases neuroanatómicas del control motor durante la fatiga.

El control del movimiento humano es el resultado de la interacción coordinada entre diversas estructuras del sistema nervioso central (Kreher, 2012). Entre las principales regiones implicadas se encuentran la corteza motora primaria, la corteza premotora, el cerebelo, los ganglios basales y la médula espinal. Estas estructuras trabajan de manera integrada para planificar, ejecutar y ajustar los movimientos voluntarios durante la actividad física.

La corteza motora primaria (M1) es responsable de la generación de las señales motoras que se transmiten hacia los músculos a través de las motoneuronas. Durante el ejercicio físico, esta región debe mantener un nivel elevado de activación para sostener la producción de fuerza (Gandevia, 2001). Sin embargo, cuando se prolonga el esfuerzo o aumenta su intensidad, la activación cortical puede disminuir, contribuyendo al desarrollo de la fatiga central.

El cerebelo cumple una función clave en la coordinación, el equilibrio y la precisión del movimiento. La fatiga puede alterar la eficiencia de los circuitos cerebelosos, provocando una disminución de la coordinación motora y un aumento del riesgo de errores técnicos durante la ejecución deportiva (Kreher, 2012).

Los ganglios basales participan en la selección y regulación de los patrones motores, así como en los procesos motivacionales relacionados con el esfuerzo físico. La fatiga central afecta la función de los ganglios basales, reduciendo la automatización de los movimientos y aumentando la demanda atencional.

Fatiga central y activación cortical: La fatiga central se caracteriza por una reducción progresiva de la capacidad del sistema nervioso central para activar voluntariamente los músculos (Gandevia, 2001). Este fenómeno se manifiesta como una disminución de la señal motora descendente desde la corteza cerebral hacia las motoneuronas espinales, lo que limita la producción de fuerza incluso en ausencia de una fatiga muscular severa.

Estudios han demostrado que, durante el ejercicio prolongado, se producen cambios en la excitabilidad cortical y en la eficiencia de las sinapsis neuronales (Bergström, 1967). Estos cambios pueden estar relacionados con la depleción de neurotransmisores, el aumento de señales inhibidoras y la acumulación de fatiga mental. Como resultado, el cerebro reduce de forma consciente o inconsciente la intensidad del esfuerzo para proteger al organismo. La fatiga central no debe interpretarse como un fallo del sistema nervioso, sino como un mecanismo regulador que permite mantener la homeostasis y prevenir daños fisiológicos mayores (Noakes, 2012).

11.2.6. Percepción del esfuerzo y fatiga mental.

Percepción del esfuerzo.

La percepción del esfuerzo es un elemento subjetivo pero fundamental dentro del rendimiento deportivo, ya que se relaciona con la sensación consciente de cuánta exigencia implica una actividad física determinada (Bergström, 1967). Esta percepción no depende solo del estado de los músculos, sino que surge de la integración de señales físicas, emocionales y mentales que el cerebro procesa durante la realización del ejercicio.

La escala de Borg (RPE) es una herramienta ampliamente utilizada para cuantificar la percepción del esfuerzo, correlacionándose con la frecuencia cardíaca, el consumo de oxígeno y los niveles de lactato sanguíneo.

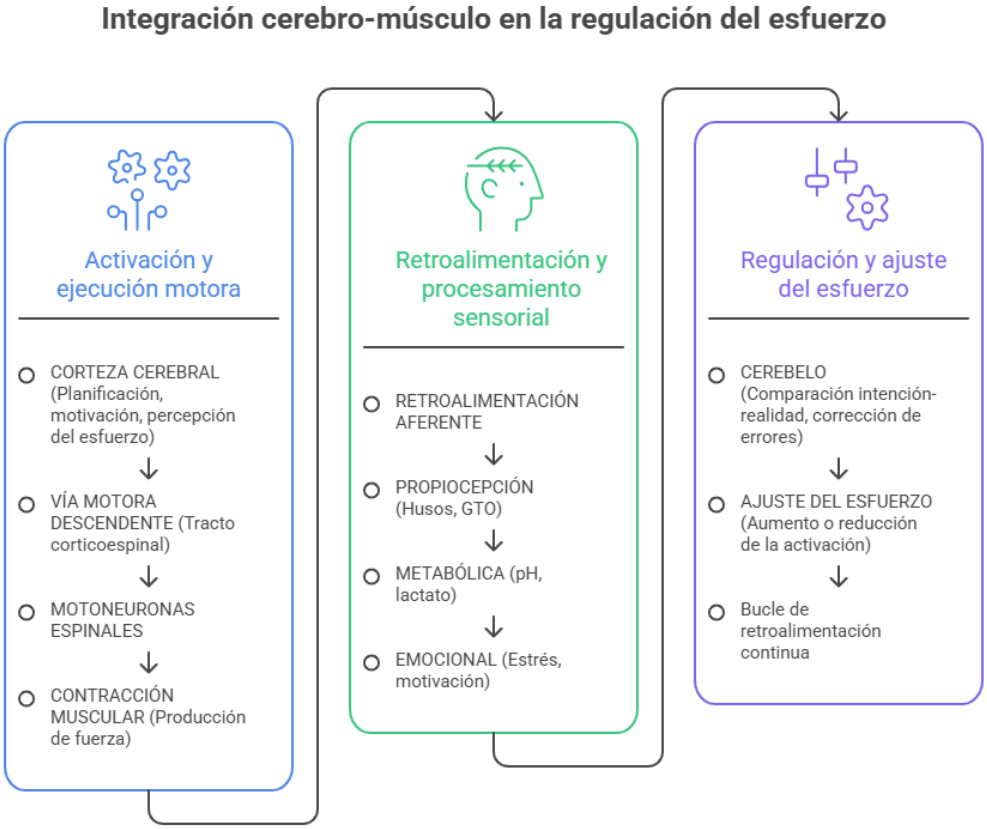
Fatiga mental.

Integración cerebro-músculo en el rendimiento deportivo.

El rendimiento deportivo es el resultado de una comunicación continua entre el cerebro y los músculos (Enoka, 2008). Esta comunicación se establece a través de vías motoras descendentes y señales aferentes que informan al sistema nervioso central sobre el estado del organismo. Durante el ejercicio, el cerebro integra esta información para ajustar la intensidad del esfuerzo de manera dinámica.

La fatiga emerge cuando este sistema de integración se ve comprometido, ya sea por alteraciones periféricas, centrales o ambas (Noakes, 2012). Desde esta perspectiva, el estudio de la neurobiología de la fatiga permite comprender el rendimiento deportivo como un proceso regulado activamente por el sistema nervioso central, y no como una simple consecuencia del agotamiento muscular.

Figura 1.



Nota: Este diagrama ilustra la integración de señales motoras descendentes y señales aferentes (propioceptivas, metabólicas y emocionales) que permiten al sistema nervioso central regular la intensidad del esfuerzo durante el ejercicio. La retroalimentación continua permite ajustes dinámicos para mantener la homeostasis y prevenir daños.

11.2.7. Neurobiología de la recuperación tras el ejercicio.

Definición de recuperación neurobiológica

La recuperación es un proceso fundamental dentro del entrenamiento deportivo y no debe entenderse únicamente como un período de descanso pasivo (Meeusen et al., 2013). Desde una perspectiva neurobiológica, la recuperación implica la restauración del equilibrio funcional del sistema nervioso central, así como la normalización de los procesos neuroquímicos alterados durante el ejercicio físico.

Tras una sesión de entrenamiento intensa, el sistema nervioso central presenta signos de fatiga asociados a la alteración en la excitabilidad cortical, la depleción de neurotransmisores y el aumento del estrés neural. La recuperación permite contrarrestar estos cambios, facilitando la

recuperación de la capacidad de movimiento y mejorando el control del cuerpo durante la actividad física (Amann, 2008).

Desde el punto de vista neurobiológico, la recuperación también está relacionada con procesos de neuroplasticidad, mediante los cuales el sistema nervioso reorganiza sus conexiones sinápticas para adaptarse a las demandas impuestas por el ejercicio. Estas adaptaciones contribuyen a una mayor eficiencia neural y a una mejora del rendimiento deportivo (Hawley, 2014).

11.2.8. Sueño, descanso y plasticidad neuronal.

El sueño constituye uno de los pilares fundamentales de la recuperación del sistema nervioso central (Fitts, 2008). Durante el sueño, especialmente en las fases profundas, se producen procesos de restauración neural que favorecen:

- La regulación de los neurotransmisores.
- La consolidación de la memoria motora.
- La reducción del estrés fisiológico acumulado durante el día.
- La secreción de hormona del crecimiento (GH) y la reparación tisular.

La privación del sueño afecta negativamente la activación cortical, la toma de decisiones y la percepción del esfuerzo, lo que se traduce en una disminución del rendimiento deportivo (Fitts, 2008). Además, la falta de descanso adecuado incrementa el riesgo de lesiones y prolonga los estados de fatiga central. Los deportistas de élite suelen requerir entre 8 y 10 horas de sueño para una recuperación óptima (Halson, 2014).

La plasticidad neuronal se ve favorecida por un adecuado equilibrio entre carga y recuperación. El descanso permite que el cerebro consolide las adaptaciones generadas durante el entrenamiento, optimizando el aprendizaje motor y la eficiencia del control neuromuscular (Hawley, 2014).

11.2.9. Estrés, fatiga mental y recuperación.

El estrés psicológico y la fatiga mental desempeñan un papel relevante en la regulación del rendimiento deportivo y en los procesos de recuperación (Meeusen & Roelands, 2018). La fatiga mental se asocia con alteraciones en la actividad de regiones cerebrales involucradas en

la atención, el control ejecutivo y la regulación emocional, afectando la capacidad del deportista para tomar decisiones eficaces y mantener un control motor preciso.

La gestión del estrés y la recuperación mental deben ser consideradas partes fundamentales de los programas de entrenamiento, especialmente en aquellas disciplinas deportivas que exigen altos niveles de concentración y un adecuado control de las emociones (Kreher, 2012).

11.2.10. Síndrome de sobreentrenamiento desde la neurobiología.

El síndrome de sobreentrenamiento se presenta como una forma avanzada de la fatiga prolongada y aparece cuando existe un desbalance continuo entre la intensidad del entrenamiento y los tiempos de recuperación (Meeusen et al., 2013). Desde una visión neurobiológica, este problema se vincula con alteraciones en los mecanismos que regulan las hormonas y los procesos que influyen en el estado de ánimo, la motivación y el control del esfuerzo, afectando de manera directa el bienestar y el rendimiento de la persona que practica actividad deportiva.

11.2.11. Los deportistas que atraviesan un proceso de sobreentrenamiento suelen presentar:

- Cansancio constante y persistente.
- Dificultades para dormir.
- Disminución evidente del rendimiento.
- Cambios en el estado emocional (irritabilidad, apatía).
- Pérdida progresiva de la motivación.
- Aumento de la percepción del esfuerzo para cargas submáximas.

Estos signos muestran que el sistema nervioso tiene dificultades para regular el esfuerzo y adaptarse de forma adecuada a las exigencias del entrenamiento. A nivel neuroquímico, el sobreentrenamiento se asocia con:

- Alteración del balance dopamina/serotonina: Aumento de la relación serotonina/dopamina, favoreciendo la fatiga central y la reducción de la motivación.
- Aumento del cortisol basal: Indicador de estrés crónico y mala recuperación.
- Disminución de la testosterona: Reducción del estado anabólico y de la capacidad de recuperación.

- Alteración del sistema nervioso autónomo: Predominio simpático, reducción de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC).

La prevención del sobreentrenamiento exige una organización responsable del trabajo físico, así como un seguimiento continuo de la condición del deportista y la aplicación de estrategias de recuperación que no solo consideren el aspecto corporal, sino también los procesos internos que influyen en el equilibrio y la respuesta del organismo frente al esfuerzo (Kreher, 2012).

11.2.12. Estrategias neurobiológicas de recuperación.

Existen diversas estrategias que pueden favorecer la recuperación del sistema nervioso central. Entre las más relevantes se encuentran:

Descanso adecuado y sueño

El sueño es el pilar más importante de la recuperación neurobiológica (Halson, 2014). Recomendaciones prácticas:

- Dormir entre 8 y 10 horas diarias.
- Mantener horarios regulares de sueño.
- Crear un ambiente propicio para el descanso (oscuridad, silencio, temperatura adecuada).
- Evitar pantallas y estimulantes antes de acostarse.

Periodización del entrenamiento

La periodización permite alternar períodos de alta y baja intensidad, favoreciendo la adaptación neurobiológica y previniendo el sobreentrenamiento (Kreher, 2012). Se recomienda:

- Incluir microciclos de descarga cada 3-4 semanas.
- Periodizar la carga cognitiva junto con la carga física.
- Alternar entrenamientos de alta y baja intensidad.

Nutrición y recuperación neurobiológica

La nutrición desempeña un papel importante en la recuperación neurobiológica, proporcionando los sustratos necesarios para la síntesis de neurotransmisores y la restauración del equilibrio energético (Davis et al., 2003). Recomendaciones:

- Ingesta de carbohidratos post-ejercicio para reponer glucógeno.
- Ingesta de proteínas para la reparación tisular.

- Triptófano y carbohidratos para modular la serotonina.
- Cafeína (antagonista de adenosina) para reducir la percepción del esfuerzo, pero con precaución para no afectar el sueño.

Técnicas de recuperación activa

La recuperación activa (ejercicios de baja intensidad, estiramientos, movilidad) favorece la eliminación de metabolitos y la restauración del equilibrio del sistema nervioso autónomo.

11.2.13. Manejo del estrés y recuperación mental.

Técnicas como la meditación, el mindfulness, la respiración consciente y el biofeedback pueden ayudar a reducir el estrés y mejorar la recuperación mental, modulando la actividad del sistema nervioso autónomo y reduciendo el cortisol (Kreher, 2012).

Aplicaciones prácticas para entrenadores y deportistas

A partir de la evidencia revisada, se proponen las siguientes recomendaciones prácticas:

1. Monitorizar la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC). Una VFC baja o una relación simpático/parasimpático elevada puede indicar estrés acumulado y riesgo de sobreentrenamiento. Realizar mediciones diarias al despertar.
2. Planificar microciclos de descarga. Incluir semanas de menor intensidad y volumen cada 3-4 semanas para permitir la recuperación neurobiológica.
3. Optimizar el sueño. Implementar rutinas de higiene del sueño y educar a los deportistas sobre la importancia del descanso para la recuperación y el rendimiento.
4. Evaluar la percepción del esfuerzo (RPE). Utilizar la escala de Borg para monitorizar la carga percibida y ajustar el entrenamiento según el estado del deportista.
5. Incorporar estrategias de recuperación mental. Incluir técnicas de relajación, mindfulness y respiración consciente en la rutina diaria.
6. Ajustar la nutrición según la fase del entrenamiento. Asegurar una ingesta adecuada de carbohidratos, proteínas y micronutrientes para favorecer la recuperación neuroquímica.
7. Reconocer los signos tempranos de sobreentrenamiento. Estar atento a cambios en el estado de ánimo, la motivación, la calidad del sueño y la percepción del esfuerzo.
8. Individualizar las estrategias de recuperación. Adaptar las recomendaciones según la edad, sexo, nivel de entrenamiento y tipo de deporte.

11.2.14. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras.

A pesar del avance en la comprensión de la neurobiología de la fatiga y la recuperación, existen limitaciones importantes:

- La mayoría de los estudios se han realizado en condiciones de laboratorio, con ejercicios estandarizados que no reflejan la complejidad de los deportes de equipo o de adversario. Se necesitan investigaciones de campo con mayor validez ecológica (Marcora et al., 2009).
- No se han analizado suficientemente las diferencias individuales (sexo, edad, genética, tipo de deporte) en los mecanismos de fatiga y recuperación.
- La interacción entre los sistemas neural, endocrino e inmunológico durante la fatiga y la recuperación no se comprende completamente.
- El papel de la fatiga mental en el rendimiento deportivo y su interacción con la fatiga física requieren más investigación (Marcora et al., 2009).
- Las técnicas de neuroimagen (fMRI, fNIRS, EEG) aplicadas al deporte aún son limitadas en su uso práctico durante el entrenamiento y la competición.

Futuras líneas de investigación deberían explorar: (a) el uso de biomarcadores (cortisol salival, testosterona, ratio testosterona/cortisol, VFC) para la monitorización del estado neurobiológico; (b) el desarrollo de protocolos de entrenamiento personalizados basados en perfiles neurofisiológicos; (c) la interacción entre la fatiga mental y la fatiga física; (d) el papel de la nutrición y la suplementación en la modulación de la fatiga central; y (e) el impacto del sueño y el descanso en la consolidación de las adaptaciones neuronales.

11.3. CONCLUSIONES

La neurobiología de la fatiga y la recuperación ofrece una base sólida para comprender el rendimiento deportivo de forma integral, ya que el cerebro no solo acompaña al cuerpo durante el ejercicio, sino que lo regula, lo dirige y lo protege, convirtiéndose en el eje central de la adaptación y del cuidado del deportista.

La fatiga no debe entenderse como un error del organismo, sino como un mecanismo natural de regulación y protección que el cerebro utiliza para cuidar la integridad de la persona frente a esfuerzos excesivos. Durante mucho tiempo, la fatiga fue explicada de manera limitada, centrándose casi exclusivamente en el cansancio muscular. Sin embargo, los aportes de la

neurociencia han demostrado que el sistema nervioso cumple un papel clave en la aparición y control de la fatiga, ya que el cerebro analiza de forma constante la información que recibe del cuerpo, del entorno y del estado emocional, ajustando el nivel de esfuerzo tanto de manera consciente como inconsciente.

La recuperación adquiere un valor esencial dentro de este enfoque. Recuperarse no significa solo dejar de entrenar, sino permitir que el sistema nervioso recupere su equilibrio interno. En este proceso intervienen factores como el sueño, el control del estrés, la planificación adecuada del entrenamiento y el bienestar emocional, elementos sin los cuales el cuerpo no logra adaptarse de forma positiva.

La capacidad del sistema nervioso para adaptarse es un aspecto central en la relación entre fatiga, recuperación y rendimiento. Cuando el entrenamiento se combina con una recuperación adecuada, el organismo mejora su eficiencia y tolerancia al esfuerzo, mientras que la falta de descanso convierte al entrenamiento en un factor negativo que puede afectar la salud y el desempeño.

Reconocer este hecho permite optimizar el entrenamiento, prevenir lesiones, mejorar el bienestar del deportista y alcanzar un rendimiento más eficiente, consciente y sostenible. El futuro del deporte y del entrenamiento físico depende, en gran medida, de cuánto se valore y respete el papel central del sistema nervioso en la experiencia humana del esfuerzo y la recuperación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, D. G. (2008). Fatiga del músculo esquelético: Mecanismos celulares. Physiological Reviews, 88(1), 287-332. https://doi.org/10.1152/physrev.00015.2007

Amann, M., & Dempsey, J. A. (2008). La fatiga del músculo locomotor modifica la conducción motora central en humanos sanos. Journal of Physiology, 586(1), 161-173. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.142703

Bergström, J., Hermansen, L., Hultman, E., & Saltin, B. (1967). Dieta, glucógeno muscular y rendimiento físico. Acta Physiologica Scandinavica, 71(2-3), 140-150. https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1967.tb03714.x

Davis, J. M., Alderson, N. L., & Welsh, R. S. (2003). Serotonin and central nervous system fatigue: nutritional considerations. American Journal of Clinical Nutrition, 72(2), 573S-578S. https://doi.org/10.1093/ajcn/72.2.573S

Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2008). Fatiga muscular: Qué, por qué y cómo influye en la función muscular. The Journal of Physiology, 586(1), 11-23. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.144741

Fitts, R. H. (2008). El ciclo de puentes cruzados y la fatiga del músculo esquelético. Journal of Applied Physiology, 104(2), 551-558. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01018.2007

Gandevia, S. C. (2001). Factores espinales y supraespinales en la fatiga muscular humana. Physiological Reviews, 81(4), 1725-1789. https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.4.1725

Halson, S. L. (2014). Sleep in elite athletes and nutritional interventions to enhance sleep. Sports Medicine, 44(S1), 13-23. https://doi.org/10.1007/s40279-014-0147-0

Hawley, J. A., Hargreaves, M., Joyner, M. J., & Zierath, J. R. (2014). Biología integrativa del ejercicio. Cell, 159(4), 738-749. https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.10.029

Kreher, J. B., & Schwartz, J. B. (2012). Síndrome de sobreentrenamiento: Una guía práctica. Sports Health, 4(2), 128-138. https://doi.org/10.1177/1941738111434406

Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. Journal of Applied Physiology, 106(3), 857-864. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.91324.2008

Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., ... & Urhausen, A. (2013). Prevención, diagnóstico y tratamiento del síndrome de sobreentrenamiento. European Journal of Sport Science, 13(1), 1-24. https://doi.org/10.1080/17461391.2012.738618

Meeusen, R., & Roelands, B. (2018). Fatiga central: La hipótesis de la serotonina y más allá. Sports Medicine, 48(S1), 1-7. https://doi.org/10.1007/s40279-017-0832-9

Noakes, T. (2012). La fatiga es una emoción derivada del cerebro. Frontiers in Physiology, 3, 82. https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00082

Noakes, T. D., & St Clair Gibson, A. (2004). Logical limitations to the "catastrophe" models of fatigue during exercise in humans. British Journal of Sports Medicine, 38(5), 648-649. https://doi.org/10.1136/bjsm.2003.007435

Sahlin, K. (2014). Muscle fatigue and lactic acid accumulation. Acta Physiologica Scandinavica, 162(3), 279-288. https://doi.org/10.1046/j.1365-201X.1998.0292a.x

CAPÍTULO 12: NEUROPLASTICIDAD Y ADAPTACIONES FUNCIONALES DEL SISTEMA NERVIOSO AL ENTRENAMIENTO.

AUTOR: Lcda. Silvia Del Carmen Lozano Chaguay, Msc.

NEUROPLASTICIDAD Y ADAPTACIONES FUNCIONALES DEL SISTEMA NERVIOSO AL ENTRENAMIENTO.

NEUROPLASTICITY AND FUNCTIONAL ADAPTATIONS OF THE NERVOUS SYSTEM TO TRAINING.

AUTOR: Lcda. Silvia Del Carmen Lozano Chaguay, Msc.

Correo: slozano@utb.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1160-497X

Resumen

La neuroplasticidad, entendida como la capacidad del sistema nervioso para modificar su estructura, conectividad y función en respuesta a estímulos del entorno, experiencias o entrenamiento, constituye el fundamento biológico de la mejora del rendimiento deportivo y la adquisición de habilidades motoras. Este capítulo revisa la evidencia actual sobre los mecanismos moleculares, celulares y sistémicos de la neuroplasticidad inducida por el entrenamiento. Se analizan las adaptaciones del sistema nervioso central (SNC) y periférico (SNP) en respuesta a diferentes modalidades de ejercicio (fuerza, habilidades motoras, aeróbico), destacando el papel del factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF), la potenciación a largo plazo (LTP) y los cambios epigenéticos. Se examina la importancia de la neuroplasticidad en el aprendizaje motor, la rehabilitación de deportistas lesionados y los factores que modulan la respuesta plástica (intensidad, duración, edad, genética). Finalmente, se derivan aplicaciones prácticas para entrenadores y deportistas, y se señalan las limitaciones de la investigación actual y futuras líneas de estudio.

Palabras clave: neuroplasticidad, adaptaciones funcionales, sistema nervioso central, sistema nervioso periférico, entrenamiento, aprendizaje motor.

Abstract

Neuroplasticity, understood as the nervous system's capacity to modify its structure, connectivity, and function in response to environmental stimuli, experiences, or training, constitutes the biological basis for improved athletic performance and the acquisition of motor skills. This chapter reviews the current evidence on the molecular, cellular, and systemic mechanisms of training-induced neuroplasticity. Adaptations of the central (CNS) and

peripheral (PNS) nervous systems in response to different types of exercise (strength, motor skills, aerobic) are analyzed, highlighting the role of brain-derived neurotrophic factor (BDNF), long-term potentiation (LTP), and epigenetic changes. The importance of neuroplasticity in motor learning, the rehabilitation of injured athletes, and the factors that modulate the plastic response (intensity, duration, age, genetics) are examined. Finally, practical applications for coaches and athletes are derived, and the limitations of current research and future lines of study are outlined.

Keywords: neuroplasticity, functional adaptations, central nervous system, peripheral nervous system, training, motor learning.

12.1. INTRODUCCIÓN

La neuroplasticidad se entiende como la habilidad del sistema nervioso central (SNC) y periférico (SNP) para alterar su estructura, conectividad y función en respuesta a estímulos del entorno, experiencias o entrenamiento (Rosso et al., 2025). Este concepto representa uno de los desarrollos más significativos en la neurociencia del siglo XXI, ya que ha cambiado la visión tradicional que consideraba al cerebro como un órgano inmutable con capacidad de adaptación limitada tras la infancia. Estudios realizados desde la década de 2000 y consolidados en publicaciones posteriores evidencian que la plasticidad neural se mantiene a lo largo de toda la vida, influenciada por factores como el tipo, intensidad, duración y continuidad del entrenamiento, así como por características individuales como la edad, el estado de salud y la predisposición genética (Rosso et al., 2025; Mansoor et al., 2025).

En el ámbito deportivo y en las actividades físicas programadas, la neuroplasticidad es el fundamento biológico que sustenta la mejora progresiva en el rendimiento motor, la adquisición y perfeccionamiento de habilidades complejas, y la adaptación a demandas específicas del ejercicio. Históricamente, se atribuían exclusivamente a adaptaciones musculares, cardiovasculares y metabólicas los cambios en el rendimiento deportivo. Sin embargo, la evidencia científica reciente muestra que las modificaciones en el sistema nervioso son las primeras en ocurrir y son cruciales para el desarrollo de capacidades físicas superiores. Por ejemplo, durante las primeras semanas de un programa de entrenamiento de resistencia, aproximadamente el 70-80% del aumento en la producción de fuerza puede atribuirse a adaptaciones neurales, mientras que los cambios en la masa muscular comienzan a predominar después de ocho semanas continuas de entrenamiento (Škarabot et al., 2020).

La comprensión de cómo el entrenamiento induce neuroplasticidad es particularmente relevante en el deporte profesional, donde las diferencias entre el éxito y el fracaso pueden medirse en fracciones mínimas. Los atletas profesionales buscan constantemente métodos para optimizar su preparación; conocer cómo se adapta el sistema nervioso al ejercicio permite diseñar programas más efectivos, personalizados y seguros (Hortobágyi et al., 2020). Además, mediante la práctica regular se modifican rutas metabólicas y epigenéticas influyentes sobre la plasticidad neural. Investigaciones llevadas a cabo por Mansoor et al. (2025) han evidenciado que los entrenamientos regulares inducen alteraciones en la acetilación histónica y la metilación del ADN relacionadas con la función neuronal, lo que facilita una expresión génica propicia para la adaptación celular duradera. Estos cambios epigenéticos pueden persistir semanas o meses tras cesar los entrenamientos, sugiriendo efectos prolongados sobre la función nerviosa.

El objetivo principal de este capítulo es examinar detalladamente los mecanismos moleculares, estructurales y funcionales asociados a la neuroplasticidad inducida por el entrenamiento, así como abordar las adaptaciones particulares del SNC y SNP según las modalidades de ejercicio. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir los mecanismos celulares y moleculares de la neuroplasticidad inducida por el entrenamiento; (2) analizar las adaptaciones del sistema nervioso central a diferentes tipos de entrenamiento; (3) examinar las modificaciones funcionales del sistema nervioso periférico; (4) evaluar la importancia de la neuroplasticidad en la rehabilitación de deportistas lesionados; (5) identificar los factores que modulan la magnitud y dirección de las adaptaciones plásticas; y (6) derivar aplicaciones prácticas para entrenadores y deportistas.

12.2. DESARROLLO

12.2.1. Concepto y tipos de neuroplasticidad.

Definición de neuroplasticidad

La neuroplasticidad se refiere a la capacidad del sistema nervioso de reorganizar sus conexiones neuronales, alterar la fuerza sináptica y crear nuevas redes neuronales en respuesta a estímulos continuos y experiencias repetidas (Cardoso et al., 2024). Esta propiedad esencial del sistema nervioso permite adaptarse a las demandas del entorno, compensar lesiones funcionales y mejorar el aprendizaje motor y cognitivo. La neuroplasticidad se manifiesta a lo largo de toda la vida, aunque es más pronunciada en la infancia y la adolescencia, cuando el sistema nervioso presenta una mayor receptividad (Rosso et al., 2025).

12.2.2. Tipos de neuroplasticidad.

La neuroplasticidad se clasifica en dos grandes categorías:

Plasticidad funcional: Se refiere a los cambios en la eficacia de las conexiones sinápticas existentes, sin que haya necesariamente una modificación en la estructura física de las neuronas. Incluye mecanismos como la potenciación a largo plazo (LTP) y la depresión a largo plazo (LTD) , que modulan la fuerza de las sinapsis en función de la actividad (Dayan & Cohen, 2011).

Plasticidad estructural: Implica cambios en la morfología de las neuronas, como la formación de nuevas espinas dendríticas, el aumento de la densidad sináptica, la sinaptogénesis y la neurogénesis adulta (generación de nuevas neuronas en el hipocampo) (Draganski et al., 2004; Erickson et al., 2011).

Plasticidad homeostática: Mecanismos que mantienen la actividad neuronal dentro de rangos funcionales, compensando los cambios inducidos por la plasticidad hebbiana (LTP/LTD).

Tabla 1.

Tipos de neuroplasticidad y sus mecanismos

Tipo de plasticidad	Mecanismo	Ejemplo en el deporte	Estrategia de entrenamiento
Plasticidad funcional	Potenciación a largo plazo (LTP), depresión a largo plazo (LTD)	Mejora de la precisión en un golpe de tenis tras la práctica repetida	Práctica repetida con retroalimentación inmediata
Plasticidad estructural	Sinaptogénesis, neurogénesis, formación de espinas dendríticas	Aumento del volumen de materia gris en la corteza motora de un pianista	Entrenamiento prolongado y consistente
Plasticidad homeostática	Regulación de la excitabilidad neuronal	Mantenimiento del rendimiento bajo fatiga	Periodización de cargas, recuperación adecuada

12.2.3. Mecanismos moleculares y celulares de la neuroplasticidad inducida por el entrenamiento

La neuroplasticidad se fundamenta en una serie de procesos celulares y moleculares que regulan la creación de nuevas sinapsis, la potenciación sináptica a largo plazo (LTP) y la modulación de la actividad neuronal.

Factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF)

El factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF) es un mediador fundamental en la plasticidad neural. Su expresión aumenta notablemente con el ejercicio físico, particularmente en áreas del cerebro vinculadas al control motor y a funciones cognitivas, como el hipocampo y la corteza motora (Cardoso et al., 2024). El BDNF promueve:

- La supervivencia y diferenciación neuronal.
- El crecimiento y la ramificación dendrítica.
- La potenciación a largo plazo (LTP).
- La neurogénesis en el hipocampo.

El ejercicio aeróbico, en particular, incrementa los niveles de BDNF en el hipocampo, lo que se asocia con mejoras en la memoria espacial y el aprendizaje motor (Erickson et al., 2011; Voss et al., 2013).

12.2.4. Cambios epigenéticos inducidos por el entrenamiento.

Según Mansoor et al. (2025), el ejercicio también influye sobre las vías metabólicas y epigenéticas que favorecen la supervivencia de las neuronas, disminuyen la inflamación y optimizan la función mitocondrial. Estos cambios moleculares son esenciales para que el sistema nervioso ajuste su funcionamiento a las exigencias del entrenamiento. Los mecanismos epigenéticos incluyen:

Metilación del ADN: Modificación que regula la expresión génica.
Acetilación de histonas: Cambios en la estructura de la cromatina que facilitan o reprimen la transcripción génica.
Modificaciones de ARN no codificante: Regulación de la expresión génica post-transcripcional.

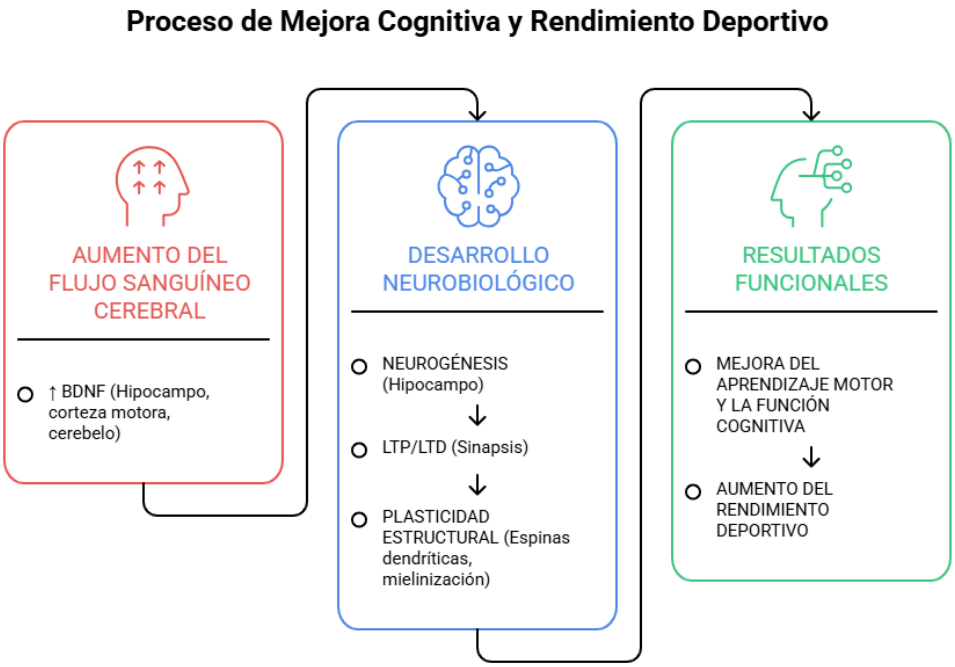
Investigaciones realizadas con ratas han demostrado que el ejercicio aeróbico incrementa la expresión de genes relacionados con la plasticidad sináptica y la neurogénesis en el hipocampo, lo cual se asocia con mejoras en memoria y coordinación motora (Voss et al., 2013).

12.2.5. Oscilaciones neuronales y plasticidad.

En humanos, un estudio realizado por Li et al. (2024) evidenció que un régimen de entrenamiento combinado (aeróbico más entrenamiento de fuerza) altera las oscilaciones neuronales en la corteza motora, aumentando la actividad en bandas theta y gamma, asociadas a procesos de atención e integración sensoriomotora. Estas modificaciones oscilatorias son indicativas de ajustes funcionales dentro de las redes neuronales que facilitan una mejor coordinación entre los centros motores y los sistemas sensoriales.

Figura 1.

Mecanismos moleculares de la neuroplasticidad inducida por el ejercicio



Nota: Este diagrama ilustra la cascada de eventos moleculares desencadenados por el ejercicio físico, desde el aumento del flujo sanguíneo cerebral hasta la mejora del aprendizaje motor y el rendimiento deportivo, mediada por el BDNF y otros factores neurotróficos.

12.2.6. Adaptaciones del sistema nervioso central al entrenamiento.

El Sistema Nervioso Central (SNC) experimenta adaptaciones tanto estructurales como funcionales específicas según el tipo de entrenamiento realizado. A continuación, se presentan las principales modificaciones observadas en distintas modalidades.

Entrenamiento de fuerza.

Los estudios realizados por Škarabot et al. (2020) indican que los primeros aumentos en la producción de fuerza durante el entrenamiento de resistencia son atribuibles principalmente a adaptaciones neurológicas antes que a incrementos en la masa muscular. Entre estas adaptaciones se incluyen:

- Reducción de la inhibición intracortical dentro de la corteza motora.
- Aumento en la excitabilidad de las vías corticospinales.
- Mejora en la sincronización entre unidades motoras.

- Mayor eficiencia en el reclutamiento de unidades motoras.

Sin embargo, Hortobágyi et al. (2020) advierten que no siempre existe una relación directa entre la plasticidad neural y las mejoras en el rendimiento motor. En su revisión sistemática, los autores encontraron que aunque el entrenamiento resistido provoca cambios detectables mediante resonancia magnética funcional (fMRI), estos no siempre se correlacionan con aumentos significativos en la fuerza máxima o la potencia generada. Esto evidencia que los componentes involucrados en la plasticidad neural pueden ser múltiples e independientes del desempeño físico.

Entrenamiento de habilidades motoras

El aprendizaje relacionado con habilidades motoras complejas (como aquellas requeridas para ejecutar técnicas deportivas) genera patrones específicos de plasticidad tanto en la corteza motora como en la médula espinal. Christiansen et al. (2020) llevaron a cabo un estudio en el que sujetos sanos practicaron una tarea visomotora durante ocho semanas con niveles de dificultad progresivos ajustados individualmente. Los resultados mostraron:

- Un aumento significativo en la amplitud de los potenciales evocados motores (PEM).
- Una reorganización de las representaciones motoras relacionadas con los músculos utilizados.
- Mejoras notables tanto en precisión como en velocidad durante la ejecución de la tarea.

Estos hallazgos confirman que la plasticidad corticospinal juega un papel crucial para adquirir y perfeccionar habilidades motoras. Además, los investigadores enfatizaron que ajustar individualmente el nivel de dificultad maximiza la inducción plástica, debido al mantenimiento del desafío cognitivo necesario para activar mecanismos adaptativos.

Entrenamiento aeróbico.

El ejercicio aeróbico provoca adaptaciones dentro de diversas redes cerebrales, incluyendo la red por defecto, la red saliente y la red ejecutiva central (Rosso et al., 2025). En su revisión narrativa basada en 25 estudios diferentes, se concluyó que el entrenamiento aeróbico moderado a vigoroso:

- Incrementa el volumen de materia gris del hipocampo.
- Favorece el desarrollo cortical prefrontal.
- Mejora significativamente la conectividad funcional entre regiones cerebrales implicadas en capacidades cognitivas y control motor.

Estos cambios están correlacionados con avances evidentes en memoria, atención y toma de decisiones, lo cual tiene repercusiones significativas sobre el rendimiento deportivo, especialmente cuando se requiere alta demanda cognitiva. Por ejemplo, en futbolistas profesionales, los entrenamientos aeróbicos regulares se han asociado con mejoras sustanciales en el procesamiento de información durante los partidos y reducciones notables de errores tácticos (Rosso et al., 2025).

Tabla 2.

Adaptaciones del sistema nervioso central según el tipo de entrenamiento

Tipo de entrenamiento	Adaptaciones del SNC	Efectos en el rendimiento	Ejemplo deportivo
Fuerza	Reducción de inhibición intracortical, aumento de excitabilidad corticospinal, sincronización de unidades motoras	Aumento de fuerza y potencia sin cambios musculares significativos iniciales	Un levantador de pesas mejora su rendimiento antes de observar hipertrofia muscular
Habilidades motoras	Reorganización de representaciones corticales, aumento de PEM, plasticidad corticospinal	Mejora en precisión, velocidad y automatización de movimientos	Un tenista perfecciona su golpe de derecha tras semanas de práctica específica
Aeróbico	Aumento de volumen hipocampal, desarrollo prefrontal, mejora de conectividad funcional	Mejora en memoria, atención, toma de decisiones y procesamiento de información	Un futbolista reduce errores tácticos y mejora su anticipación durante el partido

12.2.7. Adaptaciones del sistema nervioso periférico al entrenamiento

El Sistema Nervioso Periférico (SNP) también exhibe formas relevantes de plasticidad funcional, especialmente visible en las vías reflejas y en la transmisión neuromuscular.

Plasticidad en vías reflejas

Zehr (2025) revisó la evidencia concerniente a la plasticidad en las vías reflejas somatosensoriales, encontrando que los entrenamientos inducen ajustes bidireccionales en las amplitudes de los reflejos musculares, dependiendo del tipo de ejercicio o tareas realizadas. Por ejemplo:

- Entrenamientos de fuerza: Incrementan la excitabilidad de las neuronas motoras espinales, modulando reflejos miostáticos como el reflejo de estiramiento, lo que permite una activación muscular más efectiva y una mejor transmisión de señales desde el SNC a los músculos.
- Entrenamientos de habilidades motoras: Modifican las respuestas cutáneas somatosensoriales, optimizando la integración de la información sensorial y la coordinación de movimientos.

Mejora de la transmisión neuromuscular

Otra adaptación significativa en el SNP involucra la mejora de la transmisión neuromuscular, específicamente en la unión neuromuscular (Škarabot et al., 2020). Investigaciones llevadas a cabo en deportistas de alto rendimiento sugieren que los programas de entrenamiento prolongados elevan:

- El número de vesículas sinápticas.
- La sensibilidad de los receptores nicotínicos.
- La velocidad y eficacia de la transmisión de señales nerviosas hacia los músculos.

Estas adaptaciones permiten movimientos musculares más rápidos y precisos en respuesta a las demandas ambientales, lo que se traduce en una mayor agilidad, una mejor estabilidad postural y un rendimiento optimizado durante las actividades deportivas.

12.2.8. Neuroplasticidad y aprendizaje motor.

El proceso de adquisición de habilidades motoras se correlaciona fuertemente con cambios neuroplásticos dentro del cerebro debido a entrenamientos repetidos y experiencias sensoriales (Dayan & Cohen, 2011). Mediante la ejecución repetida de acciones, el sistema nervioso central

forma secuencias coordinadas que se vuelven cada vez más confiables, eficaces e instintivas con el tiempo. Durante este procedimiento:

- Los enlaces sinápticos vinculados a la actividad particular se vuelven más robustos (LTP).
- Las imprecisiones del comando motor disminuyen con el tiempo (LTD).
- Se produce una reorganización cortical, con una expansión de las áreas motoras implicadas en la habilidad entrenada (Draganski et al., 2004).
- Aumenta la mielinización de los axones implicados, acelerando la velocidad de conducción.

El entrenamiento centrado en habilidades técnicas y el trabajo en equipo mejora la plasticidad cerebral al facilitar mejores patrones de memoria muscular y movimiento dentro de áreas involucradas en el procesamiento cognitivo (Christiansen et al., 2020). En consecuencia, el deportista es capaz de ejecutar acciones físicas de manera más eficiente, manteniendo una mayor precisión y coordinación mejorada, mejorando así las capacidades deportivas sin aumentar los riesgos de lesiones debido a técnicas inadecuadas.

12.2.9. Neuroplasticidad y rehabilitación en deportistas con lesiones.

La neuroplasticidad es crucial para la recuperación de lesiones en el sistema nervioso de los atletas (Wolpaw & Thompson, 2025). Las intervenciones que utilizan tecnología no invasiva, como las interfaces cerebro-computadora (ICC) y el condicionamiento operante de reflejos, pueden fomentar la plasticidad neural positiva, mejorando así la recuperación de habilidades motoras en deportistas que han sufrido lesiones medulares o accidentes cerebrovasculares.

En su investigación, Wolpaw y Thompson (2025) observaron que el condicionamiento del reflejo H del sóleo, junto con un entrenamiento de marcha específico, induce cambios plásticos en las vías espinales y corticospinales. Esto se correlacionó con mejoras significativas en la capacidad para caminar y la estabilidad postural en pacientes con lesiones medulares incompletas. Estos hallazgos sugieren que al combinar técnicas de estimulación neural con entrenamiento específico se puede optimizar la recuperación funcional en deportistas con afecciones neurológicas.

12.2.10. La plasticidad neural en la rehabilitación deportiva se basa en los principios de Kleim y Jones (2008):

- Uso: La práctica repetida es necesaria para inducir cambios plásticos.
- Especificidad: El entrenamiento debe ser específico para la habilidad que se desea recuperar.
- Intensidad: Una mayor intensidad de práctica produce mayores cambios plásticos.
- Saliencia (relevancia): Las tareas deben ser significativas para el deportista.
- Edad: La plasticidad es mayor en edades tempranas, pero persiste a lo largo de la vida.

Factores que modulan la neuroplasticidad inducida por el entrenamiento

La magnitud y dirección de las adaptaciones plásticas están influenciadas por diversos factores clave (Rosso et al., 2025; Mansoor et al., 2025):

Tipo de entrenamiento.

Como se ha señalado anteriormente, distintos tipos de entrenamiento (fuerza, habilidades motoras y aeróbico) generan diferentes patrones de plasticidad en el sistema nervioso (ver Tabla 2).

Intensidad y duración.

Rosso et al. (2025) encontraron que un entrenamiento vigoroso provoca cambios estructurales más significativos en el cerebro comparado con uno ligero o moderado. Sin embargo, el ejercicio prolongado sin una recuperación adecuada puede ocasionar fatiga neural, lo que a su vez reduce la plasticidad.

Edad: La capacidad de plasticidad neural tiende a decrecer con la edad. No obstante, la realización de ejercicio físico puede mitigar esta tendencia al aumentar la expresión del BDNF y favorecer la creación de nuevas sinapsis en adultos mayores (Li et al., 2024; Erickson et al., 2011).

Genética

Ciertos polimorfismos genéticos, como el del gen BDNF (Val66Met), afectan la forma en que el sistema nervioso responde al entrenamiento (Mansoor et al., 2025). Los individuos con el

alelo Met pueden mostrar una menor plasticidad inducida por el ejercicio en comparación con los portadores del alelo Val.

Factores epigenéticos.

El entrenamiento regular induce cambios en la metilación del ADN y la acetilación de histonas, que modulan la expresión génica y pueden persistir semanas o meses tras cesar el entrenamiento (Mansoor et al., 2025).

Estado nutricional y de hidratación.

La disponibilidad de sustratos energéticos, la hidratación y la ingesta de nutrientes (ej. triptófano, omega-3) influyen en la síntesis de neurotransmisores y factores neurotróficos, modulando la plasticidad.

12.2.11. Aplicaciones prácticas para entrenadores y deportistas.

A partir de la evidencia revisada, se proponen las siguientes recomendaciones prácticas basadas en la neuroplasticidad:

1. Periodizar las cargas de entrenamiento. La periodización permite alternar períodos de alta y baja intensidad, favoreciendo la adaptación neurobiológica y previniendo la fatiga neural. Incluir microciclos de descarga cada 3-4 semanas (Kleim & Jones, 2008).
2. Diseñar sesiones de práctica distribuida. La práctica distribuida (con intervalos de descanso) mejora la consolidación de la memoria motora y promueve cambios plásticos más duraderos en comparación con la práctica masiva (Dayan & Cohen, 2011).
3. Incorporar variabilidad en las tareas de entrenamiento. La práctica variable (diferentes contextos, velocidades, superficies) mejora la transferencia del aprendizaje y la adaptabilidad a situaciones cambiantes, estimulando una plasticidad más robusta (Christiansen et al., 2020).
4. Ajustar la dificultad de las tareas de forma individualizada. Mantener un desafío cognitivo adecuado maximiza la inducción plástica. Evitar tareas demasiado fáciles (que no estimulan la plasticidad) o demasiado difíciles (que pueden generar frustración y fatiga) (Christiansen et al., 2020).
5. Incluir ejercicios aeróbicos de intensidad moderada. El ejercicio aeróbico incrementa los niveles de BDNF y promueve la neurogénesis, mejorando la base cognitiva para el aprendizaje motor (Erickson et al., 2011; Voss et al., 2013).

6. Fomentar el sueño reparador y el descanso activo. El sueño es esencial para la consolidación de los cambios plásticos. Evitar sesiones nocturnas intensas y recomendar una higiene del sueño adecuada (Halson, 2014).
7. Evaluar la percepción del esfuerzo y la fatiga mental. Monitorizar la fatiga mental (que puede reducir la plasticidad) mediante cuestionarios de recuperación (TQR, RPE) y ajustar las cargas según el estado del deportista.
8. En rehabilitación, aplicar los principios de Kleim y Jones (2008): uso, especificidad, intensidad, saliencia, y oportunidad. Utilizar técnicas de estimulación neural (ej. ICC) combinadas con entrenamiento específico para optimizar la recuperación (Wolpaw & Thompson, 2025).

12.2.12. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras.

A pesar del avance en la comprensión de la neuroplasticidad inducida por el entrenamiento, existen limitaciones importantes:

- La mayoría de los estudios se han realizado en condiciones de laboratorio, con tareas simplificadas que no reflejan la complejidad de los deportes reales. Se necesitan investigaciones de campo con mayor validez ecológica (Hortobágyi et al., 2020).
- No se han analizado suficientemente las diferencias individuales (sexo, genética, tipo de deporte) en la respuesta plástica al entrenamiento.
- La interacción entre los sistemas neural, endocrino e inmunológico durante la plasticidad inducida por el ejercicio no se comprende completamente.
- El papel de la epigenética en la plasticidad inducida por el entrenamiento requiere más investigación, especialmente en humanos (Mansoor et al., 2025).
- Las técnicas de neuroimagen (fMRI, fNIRS, EEG) aplicadas al deporte aún son limitadas en su uso práctico durante el entrenamiento y la competición.

Futuras líneas de investigación deberían explorar: (a) el uso de neuroimagen portátil para monitorizar la plasticidad en tiempo real; (b) el desarrollo de protocolos de entrenamiento personalizados basados en perfiles genéticos y neurofisiológicos; (c) la interacción entre la plasticidad inducida por el ejercicio y otros factores (nutrición, sueño, estrés); (d) el papel de la epigenética en la regulación de la plasticidad; y (e) los efectos a largo plazo del entrenamiento sobre la plasticidad neural en diferentes grupos de edad.

12.3. CONCLUSIONES

La neuroplasticidad constituye el mecanismo esencial a través del cual el sistema nervioso se adapta al ejercicio físico, facilitando la mejora del rendimiento atlético, la adquisición de habilidades y la recuperación de lesiones. Investigaciones realizadas desde 2020 han evidenciado que la actividad física provoca modificaciones moleculares, estructurales y funcionales en los sistemas nerviosos central y periférico, influenciadas por variables como el tipo, intensidad y duración del entrenamiento, así como por las características individuales de cada persona.

Durante las primeras fases de entrenamiento, los aumentos en las capacidades atléticas se derivan principalmente de cambios dentro del sistema nervioso antes que de estructuras musculares. La activación muscular mejorada mediante un mayor reclutamiento de unidades motoras y una mejor sincronización conduce a señales neuronales más eficientes entre los músculos, minimizando la actividad antagonista redundante y optimizando los movimientos de manera eficiente, conservando así los recursos metabólicos y mejorando la precisión cinemática. Estos cambios explican la capacidad de lograr mejoras significativas en las capacidades físicas como la fuerza, la potencia y la velocidad, incluso sin un crecimiento sustancial en el tejido muscular.

El ejercicio regular también mejora la propagación de la señal neural rápidamente y la eficiencia de la comunicación neuromuscular, lo que conduce a reflejos más rápidos y movimientos corporales más suaves en respuesta a los cambios ambientales. Esta capacidad es esencial para las respuestas rápidas necesarias en eventos deportivos que exigen acciones veloces y precisas, y beneficia igualmente la vida diaria al promover movimientos suaves y prevenir accidentes.

Es necesario comprender cómo el cerebro cambia en respuesta a los ejercicios es vital para crear rutinas de entrenamiento más efectivas y seguras. El estudio de estos mecanismos permite desarrollar estrategias para mejorar la adquisición de habilidades, aumentar las capacidades deportivas y minimizar las probabilidades de lesiones, facilitando así un ajuste continuo de las respuestas corporales a los requisitos del ejercicio.

Es por eso que confirmamos que, la neuroplasticidad desempeña un papel integral en la comprensión de cómo el cerebro responde al ejercicio y su impacto en el rendimiento, el bienestar y las capacidades generales. La adquisición de conocimientos sobre estos procesos proporciona una sólida base científica para diseñar programas de entrenamiento personalizados

y subraya la importancia de la actividad física regular como método indispensable para fomentar el desarrollo integral entre las personas a lo largo de su vida útil, manteniendo al mismo tiempo altos niveles de bienestar a lo largo del tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cardoso, S. V., Fernandes, S. R., & Tomás, M. T. (2024). Therapeutic importance of exercise in neuroplasticity in adults with neurological pathology: systematic review. International Journal of Exercise Science, 17(1), 1105-1119. https://doi.org/10.70252/vzwf7949

Cassilhas, R. C., Tufik, S., & de Mello, M. T. (2016). Physical exercise, neuroplasticity, spatial learning and memory. Cellular and Molecular Life Sciences, 73(5), 975-983. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11108521/

Christiansen, L., Larsen, M. N., Madsen, M. J., Grey, M. J., Nielsen, J. B., & Lundbye-Jensen, J. (2020). Long-term motor skill training with individually adjusted progressive difficulty enhances learning and promotes corticospinal plasticity. Scientific Reports, 10(1), 15588. https://doi.org/10.1038/s41598-020-72139-8

Dayan, E., & Cohen, L. G. (2011). Neuroplasticity subserving motor skill learning. Neuron, 72(3), 443-454. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.008

Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Changes in grey matter induced by training. Nature, 427(6972), 311-312. https://doi.org/10.1038/427311a

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, 108(7), 3017-3022. https://doi.org/10.1073/pnas.1015950108

Halson, S. L. (2014). Sleep in elite athletes and nutritional interventions to enhance sleep. Sports Medicine, 44(S1), 13-23. https://doi.org/10.1007/s40279-014-0147-0

Hortobágyi, T., Granacher, U., Fernández-Del-Olmo, M., Howatson, G., Manca, A., Deriu, F., ... & Colomer-Poveda, D. (2020). Functional relevance of resistance training-induced

neuroplasticity in health and disease. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 122, 1-16. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.12.019

Hötting, K., & Röder, B. (2013). Beneficial effects of physical exercise on neuroplasticity and cognition. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 37(9), 2243-2257. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0149763413001012

Kleim, J. A., & Jones, T. A. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity: implications for rehabilitation after brain damage. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 51(1), S225-S239. https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/018)

Li, X., Qu, X., Shi, K., Yang, Y., & Sun, J. (2024). Physical exercise for brain plasticity promotion: an overview of the underlying oscillatory mechanism. Frontiers in Human Neuroscience, 18, 1133879. https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1133879

Mansoor, M., Ibrahim, A., Hamide, A., Tran, T., Candreva, E., & Baltaji, J. (2025). Exercise-induced neuroplasticity: adaptive mechanisms and preventive potential in neurodegenerative disorders. Preprints.org. https://doi.org/10.20944/preprints202503.0057.v1

Montoya Toro, S. (2024). La mejora de la neuroplasticidad por medio del ejercicio físico: una revisión narrativa. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. https://repositorio.elpoli.edu.co/handle/123456789/9051

Physio-Pedia Contributors. (2023). Neuroplasticity in clinical practice. Physio-Pedia. https://www.physio-pedia.com/Neuroplasticity_in_Clinical_Practice

Rosso, C., Brustio, P. R., Manuello, J., & Rainoldi, A. (2025). Neuroplasticity of brain networks through exercise: a narrative review about effect of types, intensities, and durations. Sports, 13(8), 280. https://doi.org/10.3390/sports13080280

Škarabot, J., Brownstein, C. G., Casolo, A., Del Vecchio, A., & Ansdell, P. (2020). The knowns and unknowns of neural adaptations to resistance training. European Journal of Applied Physiology, 121(3), 675-685. https://doi.org/10.1007/s00421-020-04567-3

Sousa Fernandes, M. S., Ordônio, T. F., Santos, G. C. J., Santos, L. E. R., Calazans, C. T., Gomes, D. A., & Santos, T. M. (2020). Effects of physical exercise on neuroplasticity

and brain function: A systematic review. Neural Plasticity, 2020, 8856621. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/8856621

Voss, M. W., Vivar, C., Kramer, A. F., & van Praag, H. (2013). Bridging animal and human models of exercise-induced brain plasticity. Trends in Cognitive Sciences, 17(10), 525-544. https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.08.001

Wolpaw, J. R., & Thompson, A. K. (2025). Enhancing neurorehabilitation by targeting beneficial plasticity. Frontiers in Rehabilitation Sciences, 4, 1198679. https://doi.org/10.3389/fresc.2023.1198679

Zehr, E. P. (2025). Training-induced adaptive plasticity in human somatosensory reflex pathways. Journal of Applied Physiology, 140(3), 567-578. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00540.2024

PARTE V.

ÉTICA, LEGISLACIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS

CAPÍTULO 13: NEUROLOGÍA DE LAS LESIONES DEPORTIVAS Y SU IMPACTO EN EL RENDIMIENTO: AUTORA: Lcda. Yngrid Paola Espin Mancilla, Msc.

NEUROLOGÍA DE LAS LESIONES DEPORTIVAS Y SU IMPACTO EN EL RENDIMIENTO

NEUROLOGY OF SPORTS INJURIES AND THEIR IMPACT ON PERFORMANCE

AUTOR: Lcda. Yngrid Paola Espin Mancilla, Msc.

Correo: yespin@utb.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0962-367X

Resumen

La neurología deportiva es una disciplina en crecimiento que estudia la interacción entre el sistema nervioso y el rendimiento deportivo, así como las lesiones neurológicas derivadas de la práctica deportiva. Este capítulo revisa los fundamentos neurobiológicos del movimiento, clasifica las lesiones deportivas con implicación neurológica (sistema nervioso central y periférico), y analiza su impacto en el rendimiento físico, cognitivo y emocional de los atletas. Se examinan las conmociones cerebrales, los traumatismos craneoencefálicos, las lesiones medulares y las neuropatías periféricas, así como sus consecuencias a corto y largo plazo. Se discute el papel de la neuroplasticidad en la rehabilitación y se presentan estrategias de prevención y entrenamiento neuromuscular. Finalmente, se derivan aplicaciones prácticas para entrenadores y profesionales de la actividad física.

Palabras clave: neurología, lesiones deportivas, sistema nervioso, rendimiento, conmoción cerebral, rehabilitación.

Abstract

Sports neurology is a growing discipline that studies the interaction between the nervous system and athletic performance, as well as neurological injuries resulting from sports participation. This chapter reviews the neurobiological basis of movement, classifies sports injuries with neurological involvement (central and peripheral nervous system), and analyzes their impact on athletes' physical, cognitive, and emotional performance. Concussions, traumatic brain injuries, spinal cord injuries, and peripheral neuropathies are examined, along with their short- and long-term consequences. The role of neuroplasticity in rehabilitation is discussed, and

neuromuscular prevention and training strategies are presented. Finally, practical applications for coaches and fitness professionals are derived.

Keywords: neurology, sports injuries, nervous system, performance, concussion, rehabilitation.

13.1. INTRODUCCIÓN

El ámbito deportivo somete al cuerpo humano a exigencias máximas. Aunque la atención suele centrarse en músculos, huesos y articulaciones, el órgano más complejo y esencial —el cerebro— también participa de forma permanente y, en ciertas ocasiones, puede verse comprometido. En este contexto surge la neurología deportiva, una disciplina relativamente reciente que ha experimentado un rápido desarrollo (Porta, 2025).

La neurología, como rama encargada del estudio del sistema nervioso, cumple un rol clave en la comprensión de la relación entre la actividad cerebral y el rendimiento deportivo, incluyendo el control del movimiento y las adaptaciones neuronales. La actividad física demanda reacciones rápidas, coordinación precisa y decisiones cognitivas constantes, procesos que dependen en gran medida del sistema nervioso. La integración de los principios neurológicos en la ciencia del deporte contribuye a optimizar los entrenamientos, disminuir la probabilidad de lesiones y mejorar el rendimiento físico en general (Freitas, 2024).

Una lesión deportiva se produce como consecuencia de una actividad física, ya sea en contextos competitivos o recreativos. Algunas se presentan de manera fortuita, mientras que otras derivan de una ejecución incorrecta de los ejercicios, del exceso de carga o del uso inapropiado del equipamiento deportivo. Según Pedrosa y Martins (2023), aproximadamente el 2,5% de las lesiones relacionadas con el deporte presentan afectación neurológica, lo cual incluye daños en el sistema nervioso periférico, lesiones traumáticas en el cerebro o la médula espinal, y otras condiciones menos frecuentes pero potencialmente mortales, como hemorragias cerebrales y disecciones arteriales.

Estas lesiones pueden ser el resultado de impactos directos, colisiones, caídas o mecanismos repetitivos de carga que superan la capacidad adaptativa del sistema nervioso. A diferencia de las lesiones musculoesqueléticas, las lesiones en el ámbito neurológico a menudo afectan la capacidad del control motor y la coordinación, elementos fundamentales para un rendimiento deportivo eficiente y seguro, y pueden requerir enfoques específicos de diagnóstico y tratamiento (Pamboris, 2024).

Además, la recuperación de estas lesiones va más allá de la reparación física; implica procesos de neuroplasticidad y rehabilitación neuromuscular en los que el sistema nervioso reorganiza sus conexiones y recupera funciones alteradas. También es importante considerar su impacto a nivel cognitivo, psicológico y emocional del atleta para ayudar en su recuperación y regreso al juego.

El objetivo principal de este capítulo es analizar la neurología de las lesiones deportivas y su impacto en el rendimiento. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir los fundamentos neurobiológicos del movimiento; (2) clasificar las lesiones deportivas con implicación neurológica; (3) analizar el impacto de estas lesiones en el rendimiento físico, cognitivo y psicológico; (4) examinar el papel de la neuroplasticidad en la rehabilitación; (5) presentar estrategias de prevención y entrenamiento neuromuscular; y (6) derivar aplicaciones prácticas para entrenadores y profesionales del deporte.

13.2. DESARROLLO

13.2.1. Fundamentos neurobiológicos del movimiento.

Organización del sistema nervioso.

El movimiento del cuerpo está regulado por una compleja red de células que conforman el sistema nervioso, integrada por miles de fibras nerviosas y terminaciones sensitivas interconectadas entre sí. El sistema nervioso se organiza en dos partes principales: el Sistema Nervioso Central (SNC) y el Sistema Nervioso Periférico (SNP) (Ruibal, 2021).

El Sistema Nervioso Central, formado por el encéfalo y la médula espinal, se encarga de recibir los estímulos, almacenar y procesar la información, y generar una respuesta que será transmitida para producir el movimiento. El encéfalo incluye estructuras clave como la corteza motora primaria (responsable de la generación de señales motoras), la corteza premotora (planificación de movimientos), el área motora suplementaria (secuenciación de movimientos), los ganglios basales (selección y automatización de acciones) y el cerebelo (coordinación, equilibrio y corrección de errores).

El Sistema Nervioso Periférico está constituido por los sistemas sensorial y motor. El primero se encarga de captar la información del entorno y del propio cuerpo (propiocepción), mientras que el segundo transmite la respuesta hacia los músculos para ejecutar el movimiento (Ruibal, 2021).

13.2.2. Función del sistema nervioso en el movimiento.

Para entender cómo actúan estos sistemas en el cuerpo, se puede considerar el siguiente ejemplo: el sistema sensorial de un tenista percibe que la pelota enviada por el oponente se dirige hacia su posición. A través de las vías aferentes del sistema sensorial, esta información se transmite a la médula espinal, desde donde llegará a los centros encargados de procesarla y decidir la acción de golpear la pelota. Una vez tomada la decisión, la señal viaja nuevamente por la médula espinal hacia el sistema motor y, mediante sus vías eferentes, se envía a los músculos agonistas responsables del golpeo, dando como resultado la ejecución del movimiento (Ruibal, 2021).

13.2.3. Control motor y aprendizaje en el deporte.

El control motor hace referencia al proceso mediante el cual el sistema nervioso central planifica y organiza la acción de músculos y articulaciones para generar movimientos voluntarios y armoniosos. No se limita únicamente a mover una parte del cuerpo, sino que implica regular aspectos como la intensidad, la rapidez, la orientación y el tiempo de movimiento, con el fin de alcanzar un objetivo concreto dentro de un entorno en constante cambio (Etessam, 2022).

13.2.4. Principios del control motor.

Retroalimentación y ajuste: El cuerpo se apoya en la información sensorial para modificar y afinar los movimientos de manera inmediata. Esto es evidente en deportes como el golf, donde leves correcciones durante la ejecución influyen directamente en la exactitud del golpe (Universidad Europea, 2025).

Coordinación intermuscular: Se refiere al trabajo conjunto y sincronizado de distintos grupos musculares para lograr movimientos eficientes y continuos. Por ejemplo, al correr, los músculos de las piernas, el tronco y la espalda deben actuar de forma coordinada.

Plasticidad motora: Es la capacidad del sistema nervioso para adaptarse y desarrollar nuevas destrezas a través de la práctica constante. Un tenista profesional mejora la precisión y técnica de sus golpes gracias a este proceso de adaptación (Universidad Europea, 2025).

13.2.5. Aplicaciones del control motor en el ámbito deportivo.

El control motor tiene aplicaciones prácticas tanto en el ámbito del deporte como en el clínico:

Es necesario comprender cómo se desarrollan y perfeccionan las habilidades motoras lo cual, permite a los entrenadores crear planes de entrenamiento más eficientes, mejorar la ejecución técnica de los atletas y disminuir el riesgo de lesiones derivadas de patrones de movimiento inadecuados (Porta, 2022).

Así mismo, el control motor permite adquirir y perfeccionar movimientos específicos, como los saltos en gimnasia o los lanzamientos en el baloncesto.

Los profesionales de la salud utilizan los fundamentos del control y aprendizaje motor para apoyar a deportistas con afecciones neurológicas como las producidas por un accidente cerebrovascular o una lesión medular. La práctica repetitiva, la retroalimentación constante y la dificultad progresiva de las tareas constituyen elementos esenciales (Porta, 2022).

13.2.6. Clasificación de las lesiones deportivas con implicación neurológica.

13.2.6.1. Lesiones del Sistema Nervioso Central.

Una de las lesiones que abordamos es la conmoción cerebral, la cual es una de las afecciones más comúnmente relacionadas con la neurología deportiva. Se caracteriza por una alteración transitoria de la función cerebral como consecuencia de un impacto directo en la cabeza o de un movimiento acelerado del cerebro dentro del cráneo (Mao & Spain, 2024).

Los deportistas están constantemente expuestos al riesgo de sufrir una conmoción cerebral, por lo que se trata de una lesión relativamente frecuente. El riesgo aumenta de manera significativa cuando las conmociones ocurren de forma repetida antes de que el atleta se haya recuperado completamente de un episodio previo. Además, incluso después de una recuperación completa, los atletas con antecedentes de conmoción cerebral presentan entre 2 y 4 veces más probabilidad de experimentar una nueva conmoción en el futuro (Mao & Spain, 2024; Guskiewicz et al., 2003).

Deportes que implican colisiones de alta velocidad (fútbol, rugby, hockey sobre hielo, lacrosse) presentan las tasas más altas de conmoción cerebral, pero ningún deporte, incluyendo porristas, está libre de riesgos (Mao & Spain, 2024).

13.2.6.2.Traumatismos craneoencefálicos (TCE).

Los traumatismos craneoencefálicos en el ámbito deportivo son menos comunes que otras lesiones; sin embargo, sus consecuencias y posibles secuelas suelen ser más graves. Su incidencia ha ido en aumento a nivel mundial debido al crecimiento de la práctica deportiva y a una mayor detección y control médico de este tipo de lesiones (Valle, 2022).

Estos traumatismos se presentan con mayor frecuencia durante las competiciones que en los entrenamientos, y su aparición y severidad dependen principalmente del tipo de deporte practicado, la posición que ocupa el jugador y su edad (Valle, 2022).

13.2.6.3. Cefaleas postraumáticas.

Las cefaleas postraumáticas consisten en dolores de cabeza persistentes que pueden presentarse después de una conmoción cerebral u otro tipo de traumatismo craneal. Su identificación y tratamiento adecuado son fundamentales para favorecer la recuperación y preservar el bienestar general del deportista (Porta, 2022).

13.2.6.4. Lesiones de la médula espinal.

Las lesiones de la médula espinal, aunque ocurren con menor frecuencia, representan un cuadro de extrema gravedad. Requieren la intervención de profesionales con formación neurológica especializada para un diagnóstico preciso, un manejo inicial adecuado y un proceso de rehabilitación prolongado (Porta, 2025).

13.2.6.5. Encefalopatía traumática crónica (ETC).

La encefalopatía traumática crónica (ETC) es una enfermedad neurodegenerativa progresiva asociada a traumatismos craneales repetidos. Se caracteriza por la acumulación de proteína tau anormal en el cerebro, y puede generar deterioro cognitivo, alteraciones de la memoria, trastornos emocionales (depresión, ansiedad, irritabilidad) y, en fases avanzadas, demencia progresiva y dificultades motoras (Medsurge, 2025).

13.2.6.6. Lesiones del Sistema Nervioso Periférico.

En el ámbito deportivo, cualquier nervio puede verse afectado, aunque existen lesiones nerviosas que aparecen con mayor frecuencia en ciertos deportes. Entre las más comunes se encuentran aquellas provocadas por compresión o por sobreuso, así como las lesiones nerviosas directas asociadas a accidentes deportivos que implican fracturas o heridas de gran magnitud (Tettenborn & Mehnert, 2020).

Las lesiones de los nervios periféricos con frecuencia pasan desapercibidas o se identifican de manera tardía, principalmente porque en el ámbito de las lesiones deportivas no es habitual acudir al neurólogo para su evaluación. El abordaje terapéutico suele ser mayoritariamente conservador e incluye fisioterapia especializada, mejora de la técnica de ejecución y, cuando se

trata de lesiones por sobreuso, ajustes en los patrones de movimiento o modificaciones en el equipamiento utilizado (Tettenborn & Mehnert, 2020).

En la actualidad no se conoce con precisión la incidencia de las lesiones de los nervios periféricos asociadas a la práctica deportiva, principalmente por la escasez de estudios al respecto. Las estimaciones disponibles indican que estas lesiones representan entre el 0,5% y el 6% del total de las lesiones deportivas (Tettenborn & Mehnert, 2020).

Tabla 1.

Clasificación de lesiones deportivas con implicación neurológica

Tipo de lesión	Mecanismo	Síntomas principales	Deportes de mayor riesgo	Enfoque terapéutico
Conmoción cerebral (LCT leve)	Impacto directo en la cabeza, movimiento acelerado del cerebro	Dolor de cabeza, mareos, confusión, pérdida de memoria, alteraciones visuales	Fútbol, rugby, hockey, boxeo, artes marciales	Reposo cognitivo y físico, retorno gradual, monitorización de síntomas
Traumatismo craneoencefálico (TCE)	Impacto severo en la cabeza, caídas, colisiones	Pérdida de conciencia, déficits motores, alteraciones cognitivas	Deportes de contacto y alta velocidad	Atención médica de urgencia, neuroimagen, rehabilitación neurológica
Lesión medular	Trauma directo en la columna, hiperextensión, compresión	Parálisis, pérdida de sensibilidad, disfunción autonómica	Deportes de contacto, buceo, equitación	Inmovilización, cirugía, rehabilitación intensiva, terapia ocupacional
Neuropatía periférica	Compresión, sobreuso, trauma directo	Hormigueo, entumecimiento, debilidad muscular, dolor	Deportes de raqueta, ciclismo, carrera	Fisioterapia, modificación de técnica, cambios en equipamiento
Cefalea postraumática	Secuela de TCE o conmoción	Dolor de cabeza persistente,	Todos los deportes con riesgo	Tratamiento farmacológico, manejo del

Tipo de lesión	Mecanismo	Síntomas principales	Deportes de mayor riesgo	Enfoque terapéutico
		sensibilidad a la luz y al sonido	de impacto	estrés, rehabilitación

13.2.7. Impacto neurológico en el rendimiento deportivo.

Impacto en la coordinación neuromuscular

La coordinación neuromuscular es un elemento clave del rendimiento deportivo, ya que requiere la acción integrada del sistema nervioso y los músculos para generar movimientos exactos, controlados y eficientes (Tettenborn & Mehnert, 2020).

Tabla 2.

Alteraciones neuromusculares y su impacto en el rendimiento físico

Alteración neuromuscular	Descripción	Impacto en el rendimiento
Disminución de la propiocepción	El daño en músculos y tendones afecta a los receptores sensoriales encargados de informar sobre la posición y el movimiento articular	Perjuicio del equilibrio y el control corporal del deportista
Modificación del reflejo miotático	Alteración de los receptores sensoriales que provoca respuestas reflejas inadecuadas ante estiramientos o contracciones	Reducción de la eficiencia del movimiento y aumento del riesgo de recaídas
Alteración de la unidad motora	El dolor y la inflamación inhiben la activación neuromuscular	Disminución de la contracción muscular, atrofia y pérdida de fuerza
Desorganización del reclutamiento y sincronización	Fallas en la coordinación entre músculos agonistas y antagonistas	Afectación del rendimiento, la estabilidad y la capacidad de generar fuerza de forma eficiente

Fuente: Adaptado de (Tettenborn & Mehnert, 2020).

13.2.8. Impacto cognitivo.

Las lesiones craneales asociadas a la práctica deportiva pueden generar efectos inmediatos en el funcionamiento físico, cognitivo y emocional (Medsurge, 2025).

Efectos a corto plazo: Dolor de cabeza, mareos, náuseas, vómitos, confusión, dificultad para concentrarse, problemas de memoria, alteraciones del sueño, irritabilidad, ansiedad y cambios bruscos en el estado de ánimo.

Efectos a largo plazo: Deterioro cognitivo (problemas de aprendizaje, alteraciones de la memoria), trastornos emocionales (depresión, ansiedad), y en casos graves, demencia progresiva y dificultades motoras (encefalopatía traumática crónica).

13.2.9. Impacto psicológico y emocional.

El cerebro es el encargado de regular las emociones, los pensamientos y la conducta. Cuando ocurre una lesión cerebral, ese equilibrio puede verse alterado, generando modificaciones tanto emocionales como cognitivas (Koren, 2025). Entre los síntomas más frecuentes se encuentran:

- Alteraciones de la regulación emocional: Cambios bruscos de estado de ánimo, irritabilidad, tristeza sin causa clara, episodios de llanto o risas inapropiadas.
- Inquietud constante: Movimientos repetitivos o continuos, dificultad para estar quieto.
- Dificultades en la conducta social: Evitar el contacto social, interrumpir conversaciones, comentarios inapropiados.
- Disminución de la motivación: Dificultad para involucrarse o iniciar actividades, incluso cuando se reconoce su importancia.
- Estrés y ansiedad competitiva: El estrés puede influir en la percepción del dolor y en la propensión a lesiones, alterando la atención, la concentración y la coordinación motora (Guamán, 2024).

13.2.10. Neuroplasticidad y rehabilitación neurológica.

Principios de la neuroplasticidad en la rehabilitación.

La neuroplasticidad es la capacidad del sistema nervioso para reorganizar sus conexiones estructurales y funcionales en respuesta a la experiencia, el entrenamiento o las lesiones (Kleim & Jones, 2008). En el contexto de las lesiones deportivas, la neuroplasticidad es fundamental para la recuperación funcional, ya que permite que áreas sanas del cerebro asuman funciones de áreas dañadas y que se restablezcan las conexiones neuronales.

Los principios de la plasticidad dependiente de la experiencia, aplicables a la rehabilitación deportiva, incluyen (Kleim & Jones, 2008):

Uso: La práctica repetida de habilidades específicas es necesaria para inducir cambios plásticos.

Especificidad: El entrenamiento debe ser específico para la función que se desea recuperar.

Intensidad: Una mayor intensidad de práctica produce mayores cambios plásticos.

Saliencia (relevancia): Las tareas deben ser significativas para el deportista.

Edad: La plasticidad es mayor en edades tempranas, pero persiste a lo largo de la vida.

Transferencia: El entrenamiento de una habilidad puede mejorar otras relacionadas.

Variabilidad: La práctica variable mejora la transferencia y la adaptabilidad.

13.2.11. Estrategias de rehabilitación basadas en neuroplasticidad.

Enfoque neurocéntrico - entrenamiento neuromotor: La rehabilitación no debe limitarse únicamente al músculo lesionado, sino que debe incorporar estrategias que contemplen el funcionamiento neuromuscular del deportista. Esto implica la reeducación de la propiocepción, la aplicación de ejercicios dirigidos a la activación muscular específica y el entrenamiento de patrones de movimientos adecuados, con el objetivo de prevenir compensaciones y favorecer una recuperación eficiente (Prezi, 2026).

Manejo del dolor basado en la neurociencia: La educación sobre el dolor es clave para que los atletas comprendan qué les ocurre y aprendan a manejarlo mejor. Esto ayuda a disminuir el miedo al movimiento, facilita una recuperación más eficaz y permite que el deportista mantenga la confianza en su capacidad para moverse y rendir adecuadamente (Prezi, 2026).

Evaluación neurológica - pruebas sensoriomotoras: La evaluación neurológica debe considerar pruebas que analicen la función sensoriomotora (propiocepción, equilibrio, coordinación), y no enfocarse solo en la fuerza muscular, para obtener una visión más completa del estado del atleta y de lo que necesita para su proceso de rehabilitación (Prezi, 2026).

Retorno al juego tras conmoción cerebral: El retorno al juego debe seguir un protocolo escalonado que incluya:

1. Reposo físico y cognitivo (síntomas resueltos).
2. Actividad aeróbica ligera.
3. Ejercicio deportivo específico sin contacto.
4. Entrenamiento sin contacto.

5. Entrenamiento con contacto pleno.
6. Retorno a la competición (Harmon et al., 2013).

13.2.12. Estrategias de prevención y entrenamiento neuromuscular.

Prevención primaria.

La prevención de lesiones neurológicas en el deporte debe abordarse desde múltiples niveles:

Equipamiento adecuado: Uso de cascos, protectores bucales y otro equipo de protección según el deporte.

Reglas y normativas: Implementación de reglas que limiten los impactos en la cabeza y la columna.

Técnica adecuada: Enseñanza de técnicas seguras para caídas, tackles y otros movimientos de riesgo.

Acondicionamiento físico: Fortalecimiento de la musculatura cervical y del tronco para absorber impactos.

Concienciación: Educación sobre los signos y síntomas de conmoción cerebral y la importancia de reportarlos.

Prevención secundaria - entrenamiento neuromuscular.

El entrenamiento neuromuscular, que abarca ejercicios como pliometría, trabajo de equilibrio y propiocepción, es importante para evitar lesiones, ya que mejora el control del sistema nervioso sobre los movimientos (Prezi, 2026). Este tipo de entrenamiento:

Fortalece la estabilidad y la coordinación.

Disminuye la probabilidad de sufrir lesiones en el futuro.

Mejora la capacidad de reacción ante situaciones imprevistas.

Favorece una mejor percepción del cuerpo en el espacio.

Detección temprana y manejo de conmociones

La detección temprana de una conmoción cerebral es fundamental para prevenir complicaciones. Los entrenadores y profesionales de la salud deben estar capacitados para reconocer los signos y síntomas de una conmoción (Mao & Spain, 2024; Harmon et al., 2013).

Aplicaciones prácticas para entrenadores y deportistas

1. Implementar protocolos de evaluación neurológica al inicio de la temporada para disponer de valores basales (McCrea et al., 2013).
2. Educar a los deportistas sobre los signos de conmoción y la importancia de reportar cualquier síntoma, sin importar lo leve que parezca.
3. Diseñar programas de entrenamiento neuromuscular que incluyan ejercicios de propiocepción, equilibrio y coordinación para prevenir lesiones.
4. Aplicar el principio de periodización para evitar el sobreentrenamiento y la fatiga, factores que aumentan el riesgo de lesiones.
5. Seguir protocolos de retorno al juego basados en la evidencia, con una progresión gradual y monitorización constante de los síntomas.
6. Incorporar la educación sobre neuroplasticidad en los programas de rehabilitación para ayudar a los deportistas a comprender su proceso de recuperación.
7. Promover un ambiente deportivo seguro que priorice la salud sobre el rendimiento a corto plazo.
8. Trabajar en la regulación emocional y el manejo del estrés como parte de la preparación integral del deportista.

13.2.13. Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras.

A pesar del avance en la comprensión de la neurología de las lesiones deportivas, existen limitaciones importantes:

- La incidencia real de las lesiones neurológicas en el deporte sigue siendo difícil de precisar debido a la falta de estudios epidemiológicos amplios y a la subnotificación de casos (Tettenborn & Mehnert, 2020).
- Los mecanismos subyacentes de la recuperación neurológica y la plasticidad en deportistas no se comprenden completamente.
- El impacto a largo plazo de las conmociones repetidas en la salud mental y cognitiva requiere más investigación longitudinal.
- No se han analizado suficientemente las diferencias de sexo en la incidencia y recuperación de lesiones neurológicas.
- Las técnicas de neuroimagen (fMRI, DTI, EEG) aplicadas al deporte aún son limitadas en su uso práctico durante el entrenamiento y la competición.

Futuras líneas de investigación deberían explorar: (a) el desarrollo de biomarcadores para la detección temprana de lesiones neurológicas; (b) la optimización de los protocolos de retorno

al juego; (c) el papel de la genética en la susceptibilidad a las lesiones neurológicas; (d) la efectividad de las intervenciones de prevención; y (e) el uso de tecnologías de neuroimagen portátil para la monitorización en tiempo real.

13.3. CONCLUSIONES

La neurología deportiva constituye un campo esencial para comprender el rendimiento y la salud de los atletas. El sistema nervioso constituye el eje central que regula el movimiento, la coordinación, el aprendizaje motor, el tiempo de reacción y la toma de decisiones, componentes fundamentales en cualquier disciplina deportiva.

Las lesiones con implicación neurológica, aunque menos visibles que las musculares o articulares, generan consecuencias más graves y duraderas. Lesiones como las conmociones cerebrales, los traumatismos craneoencefálicos, las lesiones medulares o las afectaciones de los nervios periféricos no solo afectan las capacidades físicas, sino que afectan de manera cognitiva y emocional al deportista, dando como consecuencia alteraciones en su equilibrio, memoria, concentración, estado de ánimo y estabilidad psicológica, influyendo negativamente en el rendimiento.

La recuperación de estas lesiones requiere un enfoque que vaya más allá del reposo o la rehabilitación tradicional. Conceptos como la neuroplasticidad, el entrenamiento neuromotor, la propiocepción y la educación en neurociencias del dolor constituyen herramientas fundamentales para restablecer las funciones alteradas y prevenir recaídas.

Para los profesionales de la actividad física y el deporte, integrar la neurología en la planificación del entrenamiento es fundamental para mejorar el rendimiento y la seguridad de los deportistas. No se trata solo de capacitar a deportistas rápidos o fuertes físicamente, sino de formar deportistas conscientes de su cuerpo y de la relación entre el cerebro, el movimiento y el rendimiento, y de cómo prevenir el riesgo de lesiones futuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brain Health DC. (2023). *Balancing school and sports: How functional neurology can enhance academic and athletic performance*. https://www.brainhealthdc.com/es/post/balancing-school-and-sports-how-functional-neurology-can-enhance-academic-and-athletic-performance

Etessam, J. P. (2022). Control motor en la teoría de programación motora. *Instituto de Neurociencias*. https://ineurociencias.org/control-motor-en-la-teoria-de-programacion-motora-neurociencia/

Freitas, L. H. (2024). *Neurology and sports*. StudySmarter. https://www.studysmarter.co.uk/explanations/sports-science/neurology-and-sports/

Guamán, D. (2024). *Las lesiones deportivas en el estrés de los estudiantes universitarios*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Chimborazo]. http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/14175/1/Guam%c3%a1n%20Ch.%2c%20David%20I.%20%282024%29%20Las%20Lesiones%20de%20portivas%20en%20el%20estr%c3%a9s%20de%20los%20estudiantes%20universitarios.pdf

Guskiewicz, K. M., McCrea, M., Marshall, S. W., Cantu, R. C., Randolph, C., Barr, W., ... & Kelly, J. P. (2003). Cumulative effects associated with recurrent concussion in collegiate football players. *Neurosurgery, 53*(3), 614-625. https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000080401.55109.26

Harmon, K. G., Drezner, J. A., Gammons, M., Guskiewicz, K. M., Halstead, M., Herring, S. A., ... & Roberts, W. O. (2013). American Medical Society for Sports Medicine position statement: concussion in sport. *British Journal of Sports Medicine, 47*(1), 15-26. https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091941

Kleim, J. A., & Jones, T. A. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity: implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 51*(1), S225-S239. https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/018)

Koren, L. (2025). *Concussion in athletes*. Creyos. https://creyos.com/blog/concussion-in-athletes

Mao, G., & Spain, D. (2024). Conmociones cerebrales relacionadas con los deportes. *Manual MSD*. https://www.msdmanuals.com/es/professional/lesiones-y-envenenamientos/traumatismo-encefalocraneano/conmociones-cerebrales-relacionadas-con-los-deportes

McCrea, M., Guskiewicz, K. M., Randolph, C., Barr, W. B., Hammeke, T. A., Marshall, S. W., ... & Kelly, J. P. (2013). Incidence, clinical course, and predictors of prolonged recovery time following sport-related concussion. *Journal of the International Neuropsychological Society, 19*(1), 22-33. https://doi.org/10.1017/S1355617712000881

Medicover. (2024). *Psychological effects of brain injury*. Medicover Hospitals. https://www.medicoverhospitals.in/es/articles/psychological-effects-of-brain-injury

Medsurge India Health. (2025). *How do sports injuries affect the brain?* https://medsurgeindia.com/es/how-do-sports-injuries-affect-the-brain/

Pamboris, G. (2024). Fisioterapia en neurorrehabilitación con énfasis en el deporte. *Sports, 12*(10), 276. https://doi.org/10.3390/sports12100276

Pedrosa, M., & Martins, B. (2023). Está en juego: una revisión de las lesiones neurológicas asociadas al deporte. *Elsevier*. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022510X23022645

Porta, J. (2022). Control motor en la teoría de programación motora. *Instituto de Neurociencias*. https://ineurociencias.org/control-motor-en-la-teoria-de-programacion-motora-neurociencia/

Porta, J. (2025). Neuroscience and sports medicine. *Instituto de Neurociencias*. https://ineurociencias.org/neuroscience-and-sports-medicine/

Ruibal, B. (2021). Sistema nervioso y movimiento. *Mundo Entrenamiento*. https://mundoentrenamiento.com/sistema-nervioso-y-movimiento/

Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (2017). *Motor control: Translating research into clinical practice* (5th ed.). Wolters Kluwer.

Tettenborn, B., & Mehnert, S. (2020). Lesiones de los nervios periféricos debidas al deporte. *Medizinonline*. https://medizinonline.com/es/lesiones-de-los-nervios-perifericos-debidas-al-deporte/

Universidad Europea. (2025). *Control motor: qué es y cómo aplicarlo al deporte*. https://universidadeuropea.com/blog/control-motor/

Valle, M. (2022). Conmoción cerebral y traumatismo craneoencefálico en el deporte. *Archivos de Medicina del Deporte*, 39(4), 245-256. https://archivosdemedicinadeldeporte.com/articulos/upload/articulo_4.pdf

CAPÍTULO 14: PRINCIPIOS Y APLICACIONES DE LA NEURORREHABILITACIÓN EN EL CONTEXTO DEPORTIVO:

AUTORA: Lcda. Golda Geovanna López Bustamante, Ph. D.

PRINCIPIOS Y APLICACIONES DE LA NEURORREHABILITACIÓN EN EL CONTEXTO DEPORTIVO

PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF NEUROREHABILITATION IN THE SPORTS CONTEXT

AUTORA: Lcda. Golda Geovanna López Bustamante, Ph. D.

CORREO: glopezb@utb.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8173-2400

Resumen

La neurorrehabilitación constituye un campo interdisciplinario que articula los principios de la neurociencia con la práctica deportiva, con el objetivo de restaurar, optimizar y prevenir alteraciones del movimiento derivadas de lesiones o sobrecargas. Este capítulo revisa los fundamentos neurofisiológicos del movimiento humano, el principio de neuroplasticidad y su aplicación en el deporte, así como las estrategias de rehabilitación basadas en el aprendizaje motor y la reeducación neuromotora. Se analizan las intervenciones en lesiones musculoesqueléticas y neurológicas, el impacto psicológico de la lesión, el control postural, la tecnología aplicada y los protocolos de retorno progresivo. Se destaca el rol del pedagogo deportivo como mediador del aprendizaje corporal y se enfatiza la importancia de un enfoque ético e interdisciplinario. Finalmente, se presentan aplicaciones prácticas para entrenadores y profesionales de la actividad física.

Palabras clave: neurorrehabilitación, deporte, neuroplasticidad, control motor, aprendizaje motor, rehabilitación.

Abstract

Neurorehabilitation is an interdisciplinary field that integrates the principles of neuroscience with sports practice, aiming to restore, optimize, and prevent movement impairments resulting from injuries or overuse. This chapter reviews the neurophysiological foundations of human movement, the principle of neuroplasticity and its application in sports, as well as rehabilitation strategies based on motor learning and neuromotor re-education. Interventions for musculoskeletal and neurological injuries, the psychological impact of injury, postural control,

applied technology, and progressive return-to-activity protocols are analyzed. The role of the sports educator as a facilitator of physical learning is highlighted, and the importance of an ethical and interdisciplinary approach is emphasized. Finally, practical applications for coaches and physical activity professionals are presented.

Keywords: neurorehabilitation, sport, neuroplasticity, motor control, motor learning, rehabilitation.

14.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la actividad física y el deporte han evolucionado hacia un enfoque integral que considera no solo el desarrollo de las capacidades físicas, sino también los procesos neurológicos que intervienen en el movimiento humano. Desde la pedagogía de la actividad física y el deporte, comprender cómo el sistema nervioso regula, adapta y optimiza el movimiento resulta fundamental para el diseño de procesos de enseñanza, entrenamiento y recuperación funcional. En este contexto, la neurorrehabilitación surge como un campo clave que articula el conocimiento neurocientífico con la práctica deportiva (Alfaro, Cortés, & Veloso, 2021).

Tradicionalmente, la rehabilitación deportiva se ha centrado en la recuperación de estructuras musculares, articulares y óseas. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que muchas limitaciones funcionales posteriores a una lesión no se deben exclusivamente al daño estructural, sino a alteraciones en el control motor, la propiocepción y la integración sensorial, procesos directamente regulados por el sistema nervioso (Hidalgo & Meza, 2025). Por ello, la neurorrehabilitación plantea un cambio de paradigma al priorizar la reeducación neuromotora como eje central del proceso de recuperación.

En la perspectiva pedagógica, la neurorrehabilitación no solo cumple un rol terapéutico, sino también educativo, ya que se basa en principios de aprendizaje motor, repetición significativa y adaptación progresiva del movimiento. Estos principios son coherentes con los fundamentos de la pedagogía del movimiento, en donde el cuerpo es entendido como un medio de expresión, aprendizaje y desarrollo integral de las personas (Sánchez, Abuín, & Rodríguez, 2020).

Además, resulta necesario considerar que la neurorrehabilitación en el deporte no solo impacta en la dimensión física del atleta, sino también en sus procesos cognitivos y emocionales. El aprendizaje, la motivación, la percepción del propio cuerpo y la confianza en el movimiento

influyen directamente en la manera en que el deportista enfrenta su rehabilitación y su posterior retorno a la actividad. La integración de estrategias neuroeducativas dentro de los procesos de entrenamiento y recuperación fortalece no solo la capacidad funcional del individuo, sino también su resiliencia y autonomía frente a las exigencias del entorno deportivo.

El objetivo del presente capítulo es analizar los principios fundamentales de la neurorrehabilitación y sus principales aplicaciones en el contexto deportivo, con énfasis en su aporte a la pedagogía de la actividad física y el deporte. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir los fundamentos neurofisiológicos del movimiento humano; (2) explicar el principio de neuroplasticidad y su relación con el deporte; (3) analizar las aplicaciones de la neurorrehabilitación en lesiones deportivas; (4) examinar el impacto psicológico y cognitivo de las lesiones; (5) presentar estrategias de retorno progresivo y prevención; y (6) reflexionar sobre el rol ético e interdisciplinario del pedagogo deportivo en la neurorrehabilitación.

14.2. DESARROLLO

14.2.1. Fundamentos neurofisiológicos del movimiento humano.

El movimiento humano es el resultado de una compleja interacción entre el sistema nervioso central, el sistema nervioso periférico y el sistema musculoesquelético. El cerebro, a través de estructuras como la corteza motora, el cerebelo y los ganglios basales, organiza, ejecuta y ajusta los movimientos de manera continua, permitiendo respuestas rápidas ante las demandas del entorno (Daly, Eichem, Brown, & Buchanan, 2012).

En el ámbito deportivo, esta regulación neurológica es esencial para la ejecución de gestos técnicos precisos, la adaptación a situaciones cambiantes y la toma de decisiones en tiempo real. Cuando ocurre una lesión, incluso si esta no es de origen neurológico, se produce una alteración en la comunicación entre el sistema nervioso y los músculos, afectando el patrón normal de movimiento (Alfaro, Cortés, & Veloso, 2021).

Además, es importante reconocer que el sistema nervioso no solo controla el movimiento, sino que también integra información sensorial proveniente de la vista, el oído y el sistema propioceptivo. Esta integración multisensorial permite que el deportista ajuste su postura, equilibrio y coordinación en función de las condiciones del entorno, como la superficie de juego, la velocidad del movimiento o la interacción con otros jugadores. Cuando esta integración se ve alterada por una lesión o por falta de entrenamiento específico, el desempeño

motor puede verse comprometido, evidenciando la necesidad de abordar la rehabilitación desde una perspectiva neurológica y no únicamente muscular.

En el contexto de la pedagogía de la actividad física, comprender estos fundamentos permite a los profesionales diseñar estrategias de enseñanza y recuperación que respeten los procesos neurológicos del aprendizaje motor. La neurorrehabilitación, en este contexto, se apoya en el conocimiento neurofisiológico para restablecer patrones funcionales de movimiento mediante estímulos adecuados y progresivos (Sánchez, Abuín, & Rodríguez, 2020).

14.2.2. Principio de neuroplasticidad y su relación con el deporte.

La neuroplasticidad es uno de los principios más importantes de la neurorrehabilitación. Se refiere a la capacidad del sistema nervioso para modificar su estructura y función en respuesta a la experiencia, el aprendizaje o una lesión. Este fenómeno permite que el cerebro reorganice sus conexiones neuronales para compensar funciones alteradas o adquirir nuevas habilidades (Garcés & Suárez, 2014; Kleim & Jones, 2008).

En el ámbito deportivo, la neuroplasticidad se manifiesta tanto en el aprendizaje de habilidades motrices como en la recuperación posterior a una lesión. La repetición constante de gestos técnicos, el entrenamiento específico y la práctica deliberada favorecen la consolidación de circuitos neuronales más eficientes, lo que se traduce en un mejor rendimiento (López, 2012; Dayan & Cohen, 2011).

Durante la rehabilitación, la aplicación de ejercicios funcionales y específicos estimula la neuroplasticidad de manera dirigida. Esto implica que el deportista no solo "recupera" una función, sino que reaprende a moverse, integrando nuevas estrategias motoras que fortalecen su desempeño futuro (López, 2012; Kleim & Jones, 2008).

Este principio también resalta la importancia del tiempo y la constancia en los procesos de entrenamiento y rehabilitación, ya que los cambios neuroplásticos no ocurren de manera inmediata, sino que requieren práctica sostenida y progresiva. Por ello, tanto entrenadores como pedagogos deportivos deben evitar enfoques apresurados que busquen resultados rápidos, priorizando en su lugar procesos estructurados que permitan al sistema nervioso adaptarse de manera saludable y duradera.

14.2.3. Neurorrehabilitación, atención y toma de decisiones en el deporte.

En el deporte de alto rendimiento, la ejecución del movimiento no depende únicamente de la capacidad física o del control motor, sino también de procesos cognitivos como la atención, la percepción y la toma de decisiones. Desde la neurorrehabilitación, se reconoce que estos procesos están estrechamente vinculados con la organización del movimiento, ya que el sistema nervioso debe filtrar información relevante, anticipar acciones y seleccionar respuestas motoras adecuadas en fracciones de segundo (Alfonso, 2019).

Cuando un deportista sufre una lesión, especialmente una de carácter neurológico o con impacto en el sistema sensoriomotor, su capacidad de atención y procesamiento de información puede verse alterada. Esto puede traducirse en respuestas más lentas, errores tácticos o dificultades para adaptarse a situaciones cambiantes dentro del juego, lo que refuerza la necesidad de integrar componentes cognitivos en la rehabilitación (Mao & Spain, 2024).

Desde la neurorrehabilitación deportiva, se incorporan ejercicios que no solo entrenan el movimiento, sino también la atención dividida, la anticipación y la toma de decisiones bajo presión. Estas intervenciones permiten que el deportista recupere no solo su capacidad física, sino también su agilidad mental y su capacidad de lectura del juego (Ortiz, Chávez, Islas, Orona, & Nájera, 2024).

Desde la pedagogía de la actividad física y el deporte, este enfoque es especialmente valioso, ya que promueve un aprendizaje más completo del rendimiento deportivo, integrando mente y cuerpo en un mismo proceso formativo. Así, la neurorrehabilitación contribuye a formar deportistas más conscientes, estratégicos y adaptables ante los desafíos competitivos (Ortiz et al., 2024).

14.2.4. Neurorrehabilitación y coordinación motora.

La coordinación motora es una capacidad fundamental en el deporte, ya que permite la ejecución armónica y precisa de movimientos complejos. Desde la neurorrehabilitación, se entiende que la coordinación depende de la correcta comunicación entre el sistema nervioso y los músculos, así como de la integración sensorial y la planificación motora (Rivera, 2019).

Tras una lesión, muchos deportistas presentan dificultades para coordinar sus movimientos, lo que se traduce en gestos técnicos menos eficientes o más propensos a errores. La neurorrehabilitación aborda estas dificultades mediante ejercicios progresivos que estimulan la

sincronización neuromuscular y la adaptación del sistema nervioso (Universidad de la Sabana, 2021).

Desde la pedagogía de la actividad física, el trabajo sobre la coordinación motora no solo tiene fines rehabilitadores, sino también formativos, ya que contribuye al desarrollo integral del movimiento y al aprendizaje de habilidades deportivas más complejas. Esto refuerza la importancia de integrar principios de neurorrehabilitación en los procesos de enseñanza y entrenamiento (Cano, Molero, & Carratalá, 2015).

14.2.5. Neurorrehabilitación y desarrollo de patrones de movimiento eficientes.

Los patrones de movimiento constituyen la base de cualquier gesto deportivo, ya que determinan la eficiencia, la economía y la seguridad con la que un atleta se desplaza, salta, lanza o cambia de dirección. Desde la perspectiva de la neurorrehabilitación, estos patrones dependen de la correcta coordinación entre el sistema nervioso y el sistema musculoesquelético, así como de la integración sensorial y el aprendizaje motor (Alfonso, 2019).

Tras una lesión, muchos deportistas desarrollan patrones de movimiento compensatorios que, aunque les permiten continuar con su actividad, pueden generar sobrecargas o nuevas lesiones en otras estructuras corporales. La neurorrehabilitación aborda este problema mediante la reeducación neuromotora, buscando restaurar patrones de movimiento más naturales, eficientes y biomecánicamente adecuados (Garfias, Romero, & Velasco, 2025).

Este proceso implica no solo corregir la ejecución técnica, sino también modificar las redes neuronales que sustentan el control del movimiento. A través de la repetición guiada, la variabilidad en la práctica y la retroalimentación sensorial, el sistema nervioso aprende a reorganizarse y a consolidar nuevos patrones más funcionales (Mao & Spain, 2024).

Desde la pedagogía de la actividad física, este enfoque refuerza la importancia de enseñar el movimiento desde una perspectiva integral, donde el objetivo no es solo la ejecución correcta del gesto, sino el desarrollo de una relación consciente y armoniosa entre el cuerpo y el entorno. De esta manera, la neurorrehabilitación no solo repara, sino que también educa y optimiza el movimiento deportivo (Cano, Molero, & Carratalá, 2015).

14.2.6. Aprendizaje motor y reaprendizaje del movimiento.

El aprendizaje motor es un proceso en el cual el sistema nervioso adquiere, mejora y automatiza habilidades de movimiento mediante la práctica. En la neurorrehabilitación deportiva, este concepto es fundamental, ya que la recuperación funcional depende en gran medida de la capacidad del deportista para reaprender patrones de movimiento correctos (Cano, Molero, & Carratalá, 2015; Dayan & Cohen, 2011).

A diferencia de enfoques tradicionales basados en ejercicios aislados, la neurorrehabilitación prioriza tareas significativas y contextualizadas. Esto significa que los ejercicios deben estar relacionados con gestos propios del deporte practicado, favoreciendo una transferencia más efectiva al contexto real de competencia (Ortiz et al., 2024).

En la pedagogía de la actividad física, este enfoque resulta coherente con los principios didácticos del aprendizaje significativo, donde el estudiante o deportista participa activamente en su proceso de formación, comprendiendo el propósito de cada tarea y desarrollando una mayor conciencia corporal (Ortiz et al., 2024).

El aprendizaje motor no solo implica la ejecución correcta del movimiento, sino también la capacidad de adaptarlo a diferentes contextos y situaciones imprevisibles propias del deporte. Esto refuerza la necesidad de diseñar actividades de entrenamiento y rehabilitación que incluyan variabilidad, desafíos progresivos y situaciones cercanas a la realidad competitiva, favoreciendo así una mayor flexibilidad y resiliencia en el control motor del deportista (Ortiz et al., 2024).

14.2.7. Neurorrehabilitación en lesiones musculoesqueléticas deportivas.

Aunque muchas lesiones deportivas afectan principalmente músculos, tendones o ligamentos, su impacto sobre el sistema nervioso es considerable. Lesiones como esguinces de tobillo o roturas ligamentarias generan alteraciones en la propiocepción y el control neuromuscular, aumentando el riesgo de recaídas si no se abordan adecuadamente (Daly, Eichem, Brown, & Buchanan, 2012).

La neurorrehabilitación en estos casos se enfoca en restablecer la comunicación neuromuscular mediante ejercicios de equilibrio, coordinación y control postural. Estas intervenciones permiten mejorar la estabilidad articular y optimizar la respuesta del sistema nervioso ante estímulos externos (Garfias, Romero, & Velasco, 2025).

En el enfoque pedagógico, este proceso implica educar al deportista en el reconocimiento de su propio cuerpo, fomentando la autorregulación del movimiento y la prevención de futuras lesiones. Así, la neurorrehabilitación se convierte en una herramienta formativa además de terapéutica (Daly et al., 2012).

Además, este enfoque permite que el deportista comprenda que la rehabilitación no se limita a fortalecer la zona lesionada, sino a restablecer patrones de movimiento globales que involucren todo el cuerpo. Esto favorece una recuperación más integral y reduce la probabilidad de compensaciones biomecánicas que puedan generar nuevas lesiones en otras partes del sistema musculoesquelético.

14.2.8. Impacto psicológico de la lesión y la neurorrehabilitación.

Las lesiones deportivas no solo generan consecuencias físicas, sino también un impacto significativo en el ámbito psicológico y emocional del deportista. El miedo a una nueva lesión, la frustración por la pérdida temporal de rendimiento y la ansiedad ante el retorno a la competencia pueden influir directamente en el proceso de rehabilitación. Desde la neurorrehabilitación, se reconoce que las emociones y los procesos cognitivos están estrechamente vinculados con el control motor y la recuperación funcional (Daly et al., 2012).

En este sentido, resulta fundamental considerar al deportista como un ser integral, en el que cuerpo y mente interactúan de manera constante. Un enfoque de neurorrehabilitación que integre estrategias de acompañamiento emocional y motivacional favorece una recuperación más estable, al reducir tensiones innecesarias y fortalecer la confianza del atleta en su propio cuerpo y capacidades (Sánchez, Abuín, & Rodríguez, 2020).

Desde la pedagogía de la actividad física y el deporte, el profesional cumple un rol clave al brindar apoyo, fomentar la reflexión y promover una actitud positiva hacia el proceso de rehabilitación. Esto no solo contribuye a una mejor recuperación física, sino también al desarrollo de habilidades emocionales y de resiliencia que serán útiles a lo largo de la carrera deportiva (Napóles, Quesa, Díaz, & Vicente, 2023).

14.2.9. Conmoción cerebral y neurorrehabilitación deportiva.

La conmoción cerebral es una de las lesiones neurológicas más relevantes en el deporte, especialmente en disciplinas de contacto. Aunque sus manifestaciones pueden ser transitorias,

una gestión inadecuada del retorno a la actividad física puede generar consecuencias a largo plazo (Garfias, Romero, & Velasco, 2025; Harmon et al., 2013).

La neurorrehabilitación en estos casos incluye la recuperación progresiva de funciones cognitivas, el equilibrio y la coordinación, respetando los tiempos de adaptación del sistema nervioso. Este proceso debe ser cuidadosamente supervisado y adaptado a cada deportista (Garfias et al., 2025; McCrea et al., 2013).

Considerando la pedagogía de la actividad física, el profesional cumple un rol clave en la educación del deportista, promoviendo una cultura de autocuidado y conciencia sobre la importancia de la salud neurológica en el rendimiento deportivo (Daly et al., 2012).

Resulta fundamental que el retorno al deporte tras una conmoción cerebral no se base únicamente en criterios físicos, sino que también considere la estabilidad emocional y cognitiva del deportista. Un enfoque precipitado puede aumentar el riesgo de nuevas lesiones o de efectos acumulativos, por lo que la neurorrehabilitación debe priorizar siempre la seguridad y el bienestar integral del atleta (Harmon et al., 2013; Guskiewicz et al., 2003).

14.2.10. Neurorrehabilitación y retorno progresivo al deporte.

El retorno al deporte después de una lesión es una de las etapas más críticas dentro del proceso de rehabilitación. No basta con que el deportista esté libre de dolor o haya recuperado fuerza muscular; es necesario que su sistema nervioso esté preparado para responder adecuadamente a las demandas del juego (Sánchez, Abuín, & Rodríguez, 2020).

Desde la neurorrehabilitación, el retorno progresivo al deporte se basa en la reintroducción gradual de estímulos específicos, respetando los tiempos de adaptación neurológica. Esto implica pasar por fases que van desde ejercicios controlados hasta situaciones reales de competencia, evaluando constantemente la respuesta del deportista (Sánchez et al., 2020).

Desde la perspectiva pedagógica, este proceso también tiene un componente educativo, ya que el deportista aprende a reconocer sus límites, gestionar su esfuerzo y tomar decisiones más conscientes respecto a su salud y rendimiento. Un retorno mal planificado puede generar recaídas, mientras que un enfoque estructurado favorece una reintegración segura y sostenible (Mao & Spain, 2024; Harmon et al., 2013).

14.2.11. Tecnología aplicada a la neurorrehabilitación deportiva.

El avance tecnológico ha permitido el desarrollo de herramientas innovadoras para la neurorrehabilitación deportiva, como plataformas de equilibrio, realidad virtual y sistemas de biorretroalimentación. Estas tecnologías facilitan la evaluación objetiva del control motor y la personalización de los programas de rehabilitación (Garfias, Romero, & Velasco, 2025).

El uso de tecnología aumenta la motivación del deportista y favorece el aprendizaje activo, al proporcionar retroalimentación inmediata sobre el desempeño motor. Esto refuerza el proceso de reaprendizaje y mejora la adherencia al tratamiento (Garfias et al., 2025).

No obstante, es importante señalar que la tecnología debe entenderse como un complemento y no como un sustituto de la intervención humana. El acompañamiento del pedagogo deportivo y del equipo interdisciplinario sigue siendo esencial para interpretar los resultados, guiar el proceso y garantizar que la rehabilitación mantenga un enfoque integral y centrado en la persona.

14.2.12. Neurorrehabilitación y control postural en el deporte.

El control postural es un elemento esencial para el desempeño deportivo, ya que permite mantener el equilibrio, la estabilidad y la alineación corporal durante la ejecución de movimientos dinámicos. Desde la perspectiva de la neurorrehabilitación, el control postural depende de la integración adecuada de información sensorial proveniente de la visión, el sistema vestibular y la propiocepción (Escobar, Eraso, Piedrahita, Arévalo, & Inca, 2022; Shumway-Cook & Woollacott, 2017).

Cuando un deportista sufre una lesión, especialmente en miembros inferiores o columna, su capacidad de mantener un control postural eficiente puede verse alterada. Esto no solo afecta su rendimiento, sino que también incrementa el riesgo de nuevas lesiones debido a compensaciones biomecánicas inadecuadas (Rivera, 2019).

En la neurorrehabilitación deportiva, el control postural no solo se limita a mantener el equilibrio estático, sino que también incluye la capacidad del deportista para ajustar y mejorar constantemente su postura mientras realiza movimientos complejos y rápidos. El control mencionado depende del buen funcionamiento del sistema nervioso, el cual recibe información sensorial del ambiente y del cuerpo, produciendo respuestas motoras adecuadas.

Cuando hay una lesión, especialmente en lugares como la columna, estos mecanismos pueden alterarse. El deportista puede experimentar una pérdida de estabilidad, coordinación y reacciones posturales, aumentando con ello el riesgo de compensación incorrecta y de recaída. Por ello, la neurorrehabilitación deportiva intenta fortalecer y reentrenar los movimientos a través del sistema de movimiento neuromotor.

Por ello, los programas de neurorrehabilitación deportiva incluyen ejercicios orientados a mejorar el equilibrio, la estabilidad y la percepción corporal. Desde el ámbito pedagógico, estos ejercicios también contribuyen a desarrollar una mayor conciencia postural en el deportista, promoviendo hábitos de movimiento más saludables y eficientes tanto dentro como fuera del campo de juego (Escobar et al., 2022).

14.2.13. Prevención de lesiones desde la neurorrehabilitación.

Uno de los aportes más importantes de la neurorrehabilitación en el deporte es su enfoque preventivo. Al mejorar el control neuromuscular, la coordinación y la estabilidad, se reduce significativamente el riesgo de lesiones recurrentes (Hidalgo & Meza, 2025).

En relación con la pedagogía, la prevención es un eje fundamental, ya que permite formar deportistas conscientes de su cuerpo y capaces de autorregular su movimiento. La neurorrehabilitación contribuye así a una práctica deportiva más segura y sostenible (Cano, Molero, & Carratalá, 2015).

14.2.14. Enfoque interdisciplinario y rol del pedagogo deportivo.

La neurorrehabilitación deportiva requiere un trabajo interdisciplinario que integre conocimientos médicos, fisioterapéuticos, psicológicos y pedagógicos. El pedagogo de la actividad física cumple un rol clave en la adaptación de los procesos de rehabilitación al contexto educativo y deportivo del atleta (Cano, Molero, & Carratalá, 2015).

La neurorrehabilitación puede entenderse como un puente entre la ciencia y la práctica pedagógica en el deporte, ya que permite traducir conocimientos neurocientíficos en experiencias de aprendizaje corporal significativas. Esto implica que el proceso de rehabilitación no debe limitarse a la ejecución mecánica de ejercicios, sino que debe promover la reflexión, la toma de conciencia y la comprensión del movimiento por parte del deportista. De esta manera, se fomenta un enfoque más humano e integral, en el que el desarrollo motor, cognitivo y emocional se entrelazan dentro de la formación deportiva.

Su intervención permite traducir los principios neurocientíficos en estrategias prácticas de enseñanza y entrenamiento, favoreciendo la reintegración progresiva del deportista a la actividad física y competitiva.

14.2.15. Neurorrehabilitación y rendimiento deportivo.

Aunque la neurorrehabilitación se asocia principalmente con la recuperación de lesiones, su aplicación también tiene un impacto significativo en la optimización del rendimiento deportivo. Al mejorar el control motor, la velocidad de reacción y la coordinación neuromuscular, se favorece una ejecución más eficiente de los gestos técnicos (Leon, Bayona, & Bayona, 2009).

Además, el entrenamiento neuromotor contribuye a reducir el tiempo de respuesta del deportista ante estímulos visuales, auditivos o táctiles, lo que resulta especialmente relevante en deportes de alta velocidad o toma de decisiones rápida. Esto demuestra que la neurorrehabilitación no solo repara, sino que también potencia capacidades (Leon, Bayona, & Bayona, 2009).

Desde la pedagogía de la actividad física, este enfoque refuerza la idea de que el rendimiento no depende únicamente de la condición física, sino también del desarrollo neurológico y cognitivo del deportista. Integrar la neurorrehabilitación en los programas de entrenamiento permite formar atletas más completos y conscientes de su propio movimiento (Daly et al., 2012).

14.2.16. Ética y responsabilidad en la neurorrehabilitación deportiva.

La aplicación de la neurorrehabilitación en el deporte también plantea desafíos éticos relacionados con la presión por retornar rápidamente a la competencia. En algunos contextos, entrenadores, clubes o incluso los propios deportistas pueden priorizar el rendimiento sobre la salud, poniendo en riesgo su integridad física y neurológica (Alfonso, 2019).

Desde esta perspectiva, es fundamental que los profesionales involucrados en la rehabilitación mantengan un compromiso ético con el bienestar del atleta, respetando los tiempos biológicos y neurológicos necesarios para una recuperación adecuada. La neurorrehabilitación debe orientarse siempre hacia la protección de la salud y no únicamente hacia la recuperación del rendimiento (Napóles, Quesa, Díaz, & Vicente, 2023).

Desde la pedagogía de la actividad física, este tema invita a reflexionar sobre la responsabilidad de formar deportistas críticos, capaces de tomar decisiones informadas sobre su cuerpo y su

carrera. Promover una cultura deportiva basada en el respeto por la salud y la integridad humana es un desafío clave para los profesionales del área (Napóles et al., 2023).

14.2.17. Principios de la neurorrehabilitación aplicados al deporte.

A continuación, se presenta una tabla que sintetiza los principales principios de la neurorrehabilitación y su aplicación en el contexto deportivo:

Principio	Descripción	Aplicación en el deporte
Neuroplasticidad	Capacidad del sistema nervioso para reorganizarse en respuesta a la experiencia	Diseñar programas de rehabilitación que estimulen la plasticidad mediante práctica repetitiva y significativa
Aprendizaje motor	Adquisición y automatización de habilidades mediante la práctica	Utilizar tareas funcionales y contextualizadas que favorezcan la transferencia al deporte real
Reeducación neuromotora	Restablecimiento de patrones de movimiento eficientes	Corregir compensaciones y reentrenar movimientos seguros y biomecánicamente adecuados
Integración sensorial	Procesamiento y combinación de información sensorial para el control motor	Incluir ejercicios de propiocepción, equilibrio y coordinación en la rehabilitación
Retroalimentación (feedback)	Información sobre el resultado del movimiento para guiar el aprendizaje	Proporcionar retroalimentación inmediata y específica para facilitar el reaprendizaje
Progresión gradual	Aumento progresivo de la dificultad de las tareas	Avanzar desde ejercicios controlados hasta situaciones reales de competencia
Enfoque interdisciplinario	Integración de múltiples profesionales en la rehabilitación	Coordinar acciones entre médicos, fisioterapeutas, psicólogos y pedagogos deportivos

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura revisada (Kleim & Jones, 2008; Shumway-Cook & Woollacott, 2017; Cano et al., 2015).

14.3. CONCLUSIONES

La neurorrehabilitación, entendida desde una perspectiva amplia y contemporánea, invita a replantear de manera profunda la forma en que concebimos el movimiento, la recuperación y el rendimiento en el deporte. Más allá de reparar estructuras musculares o articulares, implica reconocer al ser humano como un sistema integrado en el que el cerebro, el cuerpo, las emociones, la cognición y la experiencia corporal interactúan de manera constante. Esta visión permite comprender que cada proceso de rehabilitación no solo busca volver a la normalidad, sino construir nuevas formas de moverse, aprender, adaptarse y responder a las demandas del entorno deportivo.

A lo largo del capítulo se ha evidenciado que la neurorrehabilitación se fundamenta en principios clave como la neuroplasticidad y el aprendizaje motor, los cuales explican cómo el sistema nervioso puede reorganizarse y reaprender patrones de movimiento más eficientes tras una lesión. Asimismo, se ha destacado la importancia del control postural, la coordinación motora y la integración sensorial como elementos esenciales para un desempeño deportivo seguro y efectivo. Estos aspectos refuerzan la idea de que la recuperación no puede limitarse a la fuerza o la movilidad, sino que debe considerar la calidad del movimiento y la capacidad del sistema nervioso para regularlo adecuadamente.

Además, la incorporación de nuevos enfoques ha permitido comprender que la neurorrehabilitación no solo tiene un carácter terapéutico, sino también preventivo y potenciador del rendimiento. El impacto psicológico de la lesión, el retorno progresivo al deporte, el desarrollo de patrones de movimiento eficientes y la relación entre atención, toma de decisiones y control motor evidencian que la rehabilitación debe ser integral. Esto implica atender no solo el cuerpo, sino también la mente, las emociones y los procesos cognitivos que influyen en la manera en que el deportista se mueve, aprende y compite.

Desde la Pedagogía de la Actividad Física y el Deporte, este enfoque adquiere un significado aún más profundo, ya que posiciona al profesional no solo como un entrenador o guía físico, sino como un mediador del aprendizaje corporal y neuromotor. La neurorrehabilitación se convierte así en una herramienta formativa que educa al deportista en la conciencia de su propio cuerpo, en la comprensión de sus movimientos y en la responsabilidad sobre su salud. Esto favorece la autonomía, la resiliencia y una relación más consciente con el entrenamiento y la competencia.

Asimismo, el uso de tecnologías aplicadas a la neurorrehabilitación, como plataformas de equilibrio, realidad virtual y sistemas de biorretroalimentación, ha demostrado ser un recurso valioso para evaluar y optimizar el control motor. No obstante, se ha enfatizado que estas herramientas deben complementar y no reemplazar el acompañamiento humano y pedagógico, reafirmando la importancia del enfoque interdisciplinario entre médicos, fisioterapeutas, psicólogos y pedagogos deportivos.

En este sentido la reflexión ética sobre la neurorrehabilitación en el deporte pone en evidencia la necesidad de priorizar siempre la salud y el bienestar del deportista por encima del rendimiento o la presión competitiva. Integrar la neurorrehabilitación en los procesos de formación, entrenamiento y recuperación significa apostar por una práctica deportiva más consciente, humana y sostenible, en la que el movimiento sea entendido no solo como técnica o rendimiento, sino como una expresión integral del ser humano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfaro, A., Cortés, M., & Veloso, B. (2021). Impacto de la actividad física en el desarrollo cerebral y el aprendizaje durante la infancia y la adolescencia. *IEYA Revista (Infancia, Educación y Aprendizaje), 7*(1), 39-52. https://doi.org/10.22370/ieya.2021.7.1.1461

Alfonso, J. (2019). Neurociencia y entrenamiento en el deporte de alto rendimiento. *Revista Iberoamericana de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, 8*(2), 66-98. https://doi.org/10.24310/riccafd.2019.v8i2.6698

Cano, R., Molero, A., & Carratalá, M. (2015). Teorías y modelos de control y aprendizaje motor. Aplicaciones clínicas en neurorrehabilitación. *Neurología, 30*(1), 32-41. https://doi.org/10.1016/j.nrl.2011.12.010

Daly, B. P., Eichem, D. M., Brown, R. T., & Buchanan, C. L. (2012). Revision of Central Nervous System. *Encyclopedia of Human Behavior, 1*(2), 454-459. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375000-6.00084-7

Dayan, E., & Cohen, L. G. (2011). Neuroplasticity subserving motor skill learning. *Neuron, 72*(3), 443-454. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.008

Escobar, M., Eraso, R., Piedrahita, V., Arévalo, K., & Inca, L. (2022). El control postural y la conciencia corporal en los trastornos mentales. *Revista Criterios, 30*(1), 83-92. https://doi.org/10.31948/rev.criterios

Garcés, M. V., & Suárez, J. C. (2014). Neuroplasticidad: aspectos bioquímicos y neurofisiológicos. *CES MED*, *28*(1), 119-132. http://www.scielo.org.co/pdf/cesm/v28n1/v28n1a10.pdf

Garfias, E., Romero, M., & Velasco, J. (2025). Innovación en neurorrehabilitación: Impacto de la fisioterapia y nuevas tecnologías en pacientes con secuelas tras un evento vascular cerebral. *Revista Científica Multidisciplinaria SAGA*, *2*(2), 776-791. https://doi.org/10.63415/saga.v2i2.156

Guskiewicz, K. M., McCrea, M., Marshall, S. W., Cantu, R. C., Randolph, C., Barr, W., ... & Kelly, J. P. (2003). Cumulative effects associated with recurrent concussion in collegiate football players. *Neurosurgery*, *53*(3), 614-625. https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000080401.55109.26

Harmon, K. G., Drezner, J. A., Gammons, M., Guskiewicz, K. M., Halstead, M., Herring, S. A., ... & Roberts, W. O. (2013). American Medical Society for Sports Medicine position statement: concussion in sport. *British Journal of Sports Medicine*, *47*(1), 15-26. https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091941

Hidalgo, J., & Meza, V. (2025). El papel del entrenamiento propioceptivo en la prevención de lesiones en deportistas. *Journal Growing Health*, *2*(1), 371-395. https://doi.org/10.59282/jgh2(1)371-395

Kleim, J. A., & Jones, T. A. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity: implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *51*(1), S225-S239. https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/018)

Leon, F., Bayona, E., & Bayona, J. (2009). Neurorrehabilitación: La otra revolución del siglo XXI. *Acta Médica Colombiana*, *34*(2), 23-32. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-24482009000200007

López, L. (2012). Neuroplasticidad y sus implicaciones en la rehabilitación. *Universidad y Salud*, *14*(2), 89-96. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072012000200009

Mao, G., & Spain, D. (2024). Conmociones cerebrales relacionadas con los deportes. *Manual MSD*. https://www.msdmanuals.com/es/professional/lesiones-y-envenenamientos/traumatismo-encefalocraneano/conmociones-cerebrales-relacionadas-con-los-deportes

McCrea, M., Guskiewicz, K. M., Randolph, C., Barr, W. B., Hammeke, T. A., Marshall, S. W., ... & Kelly, J. P. (2013). Incidence, clinical course, and predictors of prolonged recovery time following sport-related concussion. *Journal of the International*

Neuropsychological Society, *19*(1), 22-33. https://doi.org/10.1017/S1355617712000881

Napóles, T., Quesa, M., Díaz, R., & Vicente, H. (2023). Prevención y rehabilitación para atletas de alto rendimiento desde la perspectiva interdisciplinaria. *Uleam Bahía Magazine, 4*(6), 48-56. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9946062.pdf

Ortiz, C., Chávez, A., Islas, S., Orona, A., & Nájera, R. (2024). Pedagogía y didáctica de la educación física, su impacto en la educación y salud de la niñez. *Ciencia Latina Internacional, 8*(4), 11058-11079. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4

Rivera, D. (2019). La coordinación y el equilibrio en el área de Educación Física: Actividades para su desarrollo. *EF Deportes*, *13*(1), 130-140. https://www.efdeportes.com/efd130/la-coordinacion-y-el-equilibrio-en-el-area-de-educacion-fisica.htm

Sánchez, V., Abuín, V., & Rodríguez, I. (2020). Principios del aprendizaje motor: Una revisión sobre sus aplicaciones en la rehabilitación del accidente cerebrovascular. *Revista Ecuatoriana de Neurología, 29*(3), 84-91. https://doi.org/10.46997/revecuatneurol29300084

Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (2017). *Motor control: Translating research into clinical practice* (5th ed.). Wolters Kluwer.

Universidad de la Sabana. (2021). *Revista Neuronum, 7*(2), 42-46. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9690631.pdf

CAPÍTULO 15: TERAPIAS COMPLEMENTARIAS BASADAS EN LA NEUROCIENCIA: ESTIMULACIÓN CEREBRAL PARA EL RENDIMIENTO Y LA RECUPERACIÓN DEPORTIVA: ***Dr. Constantino Darroman Hall, Msc***

TERAPIAS COMPLEMENTARIAS BASADAS EN LA NEUROCIENCIA: ESTIMULACIÓN CEREBRAL PARA EL RENDIMIENTO Y LA RECUPERACIÓN DEPORTIVA

COMPLEMENTARY NEUROSCIENCE-BASED THERAPIES: BRAIN STIMULATION FOR SPORTS PERFORMANCE AND RECOVERY

Autor: Dr. Constantino Darroman Hall, Msc
correo: *cdarroman@utb.edu.ec*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9714-2894

Resumen

Las terapias complementarias basadas en neurociencia, particularmente las técnicas de estimulación cerebral no invasiva (NIBS), han emergido como herramientas prometedoras para optimizar el rendimiento deportivo y acelerar la recuperación tras lesiones. Este capítulo revisa los fundamentos neurocientíficos y las aplicaciones prácticas de técnicas como la estimulación transcraneal de corriente directa (tDCS), la estimulación magnética transcraneal repetitiva (rTMS), la estimulación transcraneal de corriente alterna (tACS) y el neurofeedback. Se analizan los mecanismos de acción de estas tecnologías, incluyendo su capacidad para inducir plasticidad sináptica (potenciación a largo plazo, LTP), modular la excitabilidad cortical y optimizar la conectividad funcional. Se examina la evidencia actual sobre su eficacia en el aprendizaje motor, la fuerza muscular, la resistencia, la atención, la toma de decisiones y la recuperación post-lesión. Se discuten las aplicaciones en deportes específicos (voleibol, baloncesto, fútbol, golf), así como los protocolos de neurofeedback para el manejo de la presión competitiva. Finalmente, se abordan las limitaciones metodológicas, los desafíos éticos (incluyendo el debate sobre el "neurodopaje") y las perspectivas futuras de la neuromodulación en el deporte.

Palabras clave: estimulación cerebral no invasiva, neuroplasticidad, rendimiento deportivo, recuperación, neuromodulación, entrenamiento cognitivo.

Abstract

Complementary neuroscience-based therapies, particularly non-invasive brain stimulation (NIBS) techniques, have emerged as promising tools for optimizing athletic performance and accelerating recovery from injury. This chapter reviews the neuroscience-based foundations and practical applications of techniques such as transcranial direct current stimulation (tDCS), repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS), transcranial alternating current

stimulation (tACS), and neurofeedback. The mechanisms of action of these technologies are analyzed, including their ability to induce synaptic plasticity (long-term potentiation, LTP), modulate cortical excitability, and optimize functional connectivity. Current evidence on their efficacy in motor learning, muscle strength, endurance, attention, decision-making, and post-injury recovery is examined. Applications in specific sports (volleyball, basketball, soccer, golf) are discussed, as well as neurofeedback protocols for managing competitive pressure. Finally, the methodological limitations, ethical challenges (including the debate on "neurodoping"), and future prospects of neuromodulation in sport are addressed.

Keywords: non-invasive brain stimulation, neuroplasticity, athletic performance, recovery, neuromodulation, cognitive training.

15.1. INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, la neurociencia ha experimentado avances paradigmáticos que han transformado nuestra comprensión del cerebro humano y su relación con el movimiento, el aprendizaje y el rendimiento. Uno de los desarrollos más significativos ha sido la aparición de las terapias complementarias basadas en neurociencia, particularmente las técnicas de estimulación cerebral no invasiva (NIBS) , que ofrecen la posibilidad de modular la actividad neural de manera segura, indolora y no farmacológica (Deng et al., 2026; Qi et al., 2024).

El deporte de alto rendimiento exige a los atletas no solo capacidades físicas excepcionales, sino también un funcionamiento cognitivo y neurológico óptimo: atención sostenida, toma de decisiones rápida, control emocional bajo presión y aprendizaje motor eficiente. Tradicionalmente, el entrenamiento deportivo se ha centrado en adaptaciones musculares, cardiovasculares y metabólicas, con menor atención a los procesos neurológicos subyacentes. Sin embargo, la evidencia reciente indica que el sistema nervioso central (SNC) es un regulador crucial tanto del rendimiento como de la recuperación tras lesiones (Deng et al., 2026; Qi et al., 2024).

Las técnicas de NIBS (incluyendo la estimulación transcraneal de corriente directa (tDCS) , la estimulación magnética transcraneal repetitiva (rTMS) , la estimulación transcraneal de corriente alterna (tACS) y el neurofeedback EEG) han demostrado potencial para modular la actividad neural y promover la neuroplasticidad, mejorando el aprendizaje motor, la adquisición

de habilidades, la fuerza muscular, la resistencia, la atención, la toma de decisiones y la regulación emocional (Deng et al., 2026; Rosso et al., 2025). Estas técnicas, que han sido ampliamente estudiadas en contextos clínicos para la rehabilitación neurológica, están siendo cada vez más exploradas en poblaciones atléticas, con resultados prometedores pero también con importantes desafíos metodológicos y éticos.

El objetivo del presente capítulo es analizar los principios neurocientíficos, las aplicaciones prácticas y las implicaciones éticas de las terapias complementarias basadas en estimulación cerebral en el contexto deportivo. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir los fundamentos neurofisiológicos de las principales técnicas de NIBS; (2) examinar la evidencia actual sobre su eficacia en el aprendizaje motor y el rendimiento deportivo; (3) analizar sus aplicaciones en la recuperación y rehabilitación de lesiones; (4) explorar el papel del neurofeedback en el entrenamiento mental y la regulación emocional; (5) discutir las limitaciones metodológicas y los desafíos éticos, incluyendo el debate sobre el "neurodopaje"; y (6) presentar perspectivas futuras y recomendaciones para la práctica.

15.2. DESARROLLO

15.2.1. Fundamentos neurofisiológicos de la estimulación cerebral no invasiva.

Principios generales de la neuromodulación.

La estimulación cerebral no invasiva (NIBS) se define como un conjunto de técnicas capaces de modular la actividad neural y promover la neuroplasticidad mediante la aplicación externa de estímulos eléctricos o magnéticos (Deng et al., 2026). Estas técnicas operan sobre el principio de que la actividad neuronal puede ser influenciada por campos eléctricos o magnéticos que alteran el potencial de membrana de las neuronas, modificando su probabilidad de disparo y, con la repetición, induciendo cambios plásticos duraderos en las conexiones sinápticas (Qi et al., 2024).

15.2.2. Las técnicas de NIBS se dividen en dos grandes categorías:

Estimulación eléctrica transcraneal: Incluye tDCS, tACS y estimulación transcraneal de ruido aleatorio (tRNS). Estas técnicas aplican corrientes eléctricas de baja intensidad a través del cuero cabelludo para modular la excitabilidad cortical.

Estimulación magnética transcraneal: Incluye TMS y rTMS. Utilizan campos magnéticos pulsados para inducir corrientes eléctricas en regiones corticales específicas.

Estimulación transcraneal de corriente directa (tDCS).

La tDCS es una técnica que aplica una corriente eléctrica de baja intensidad (típicamente 1-2 mA) a través de electrodos colocados sobre el cuero cabelludo (Qi et al., 2024). La estimulación anódica (electrodo positivo sobre la región objetivo) aumenta la excitabilidad neuronal al despolarizar las membranas celulares, facilitando la generación de potenciales de acción. Por el contrario, la estimulación catódica (electrodo negativo) hiperpolariza las neuronas, reduciendo su excitabilidad.

A nivel celular, la tDCS anódica induce efectos similares a la potenciación a largo plazo (LTP) , un mecanismo fundamental de la plasticidad sináptica (Zhang et al., 2024). Estos efectos dependen de la activación de receptores NMDA y del influjo de calcio, y están asociados con una mayor secreción del factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF) y la activación de sus receptores TrkB (Zhang et al., 2024). Si la señalización del BDNF se bloquea o se ve afectada genéticamente, los efectos facilitadores de la tDCS sobre las sinapsis y el aprendizaje se eliminan (Zhang et al., 2024).

Estimulación magnética transcraneal repetitiva (rTMS).

La rTMS utiliza bobinas electromagnéticas para generar pulsos magnéticos que atraviesan el cráneo y producen corrientes eléctricas en la corteza cerebral (Qi et al., 2024). La estimulación de alta frecuencia (≥5 Hz) induce efectos excitatorios similares a la LTP, mientras que la estimulación de baja frecuencia (≤1 Hz) produce efectos inhibitorios similares a la depresión a largo plazo (LTD) (Deng et al., 2026).

La rTMS ha sido aprobada por la FDA para diversas indicaciones psiquiátricas (depresión mayor, trastorno obsesivo-compulsivo, cesación tabáquica) y está siendo investigada en el ámbito deportivo por su potencial para mejorar la coordinación motora, la recuperación y el rendimiento cognitivo (Moscatelli et al., 2025).

Neurofeedback EEG

El neurofeedback es una técnica de biorretroalimentación que permite a los deportistas aprender a autorregular su actividad cerebral en tiempo real (Mesfen, 2026). Utilizando electroencefalografía (EEG), se registran las ondas cerebrales y se proporciona retroalimentación visual o auditiva que indica al deportista cuándo está en un estado neural óptimo para el rendimiento. Mediante el entrenamiento repetido, los atletas aprenden a modular

voluntariamente patrones de actividad cerebral específicos, como aumentar el ritmo sensoriomotor (SMR) o reducir las ondas beta de alta frecuencia asociadas con la ansiedad (Mesfen, 2026).

El neurofeedback se basa en los principios de la neuroplasticidad dirigida, donde la retroalimentación contingente permite al sistema nervioso reorganizar sus conexiones para alcanzar estados funcionales más eficientes.

Tabla 1.

Principales técnicas de estimulación cerebral no invasiva (NIBS) y sus aplicaciones en el deporte

Técnica	Mecanismo	Efectos principales	Aplicaciones deportivas	Evidencia
tDCS (estimulación transcraneal de corriente directa)	Polarización de membranas neuronales; modulación de excitabilidad cortical	↑ Aprendizaje motor, ↑ fuerza, ↑ resistencia, ↑ retención de habilidades	Baloncesto (tiro, adquisición de habilidades tras fatiga), fútbol (fuerza, fatiga percibida), golf (aprendizaje motor)	Moderada a fuerte; metaanálisis con efecto moderado (SMD = 0.39)
rTMS (estimulación magnética transcraneal repetitiva)	Inducción electromagnética; LTP/LTD dependiente de frecuencia	↑ Coordinación motora, ↑ atención, ↑ recuperación post-ejercicio, modulación del estado de ánimo	Voleibol (coordinación interlimb), recuperación de DOMS, conmociones cerebrales, rehabilitación de lesiones de rodilla	Emergente; estudios preliminares prometedores
tACS (estimulación transcraneal de corriente alterna)	Sincronización de oscilaciones neuronales	↑ Plasticidad, ↑ conectividad funcional	Optimización de redes neuronales, mejora de la coordinación	Limitada; resultados mixtos en aprendizaje motor complejo
Neurofeedback EEG	Autorregulación de la actividad cerebral mediante retroalimentaci	↑ Atención, ↑ control emocional, ↑ resiliencia bajo presión, ↑ rendimiento en	Deportes de precisión (tiro, golf), manejo de la ansiedad competitiva,	Moderada; estudios controlados con resultados positivos

Técnica	Mecanismo	Efectos principales	Aplicaciones deportivas	Evidencia
	ón en tiempo real	situaciones de estrés	prevención del "choking"	

15.2.3. Neuroplasticidad inducida por estimulación cerebral y aprendizaje motor. Mecanismos de plasticidad sináptica.

La capacidad de la estimulación cerebral para mejorar el aprendizaje motor se fundamenta en su capacidad para inducir y potenciar mecanismos de plasticidad sináptica (Zhang et al., 2024). La tDCS anódica sobre la corteza motora primaria (M1) induce un fortalecimiento de las conexiones sinápticas similar al de la LTP, que depende de la activación de receptores NMDA y del influjo de calcio (Zhang et al., 2024). Este proceso está mediado por la liberación de BDNF, que activa vías de señalización que promueven el crecimiento y fortalecimiento de las sinapsis.

En estudios con humanos, la tDCS anódica sobre M1 ha demostrado mejorar la adquisición y retención de habilidades motoras, lo que sugiere que estos cambios plásticos pueden traducirse en un aprendizaje más rápido y duradero de gestos deportivos complejos (Zhang et al., 2024). Por ejemplo, en jugadores de baloncesto, la tDCS anódica bilateral sobre M1 mejoró significativamente la precisión en el tiro y redujo los errores en tareas de tiempo de reacción serial, especialmente en condiciones de fatiga deportiva (Zhang et al., 2024).

15.2.4. Modulación de la excitabilidad corticospinal.

Las técnicas de NIBS también modulan la excitabilidad de las vías corticospinales, lo que influye en la eficiencia de la transmisión de señales desde la corteza motora hasta los músculos (Deng et al., 2026). La rTMS de alta frecuencia sobre M1 aumenta la excitabilidad corticospinal, lo que se refleja en un aumento de la amplitud de los potenciales evocados motores (PEM) y una reducción de los umbrales motores (Deng et al., 2026).

En deportistas, estos cambios se asocian con una mejora en la coordinación, la fuerza y la velocidad de reacción. Por ejemplo, la rTMS de alta frecuencia (10 Hz) sobre la corteza prefrontal dorsolateral (DLPFC) mejoró la coordinación motora en jugadores de voleibol y redujo los umbrales motores, reflejando una mayor preparación cortical (Moscatelli et al., 2025).

15.2.5. Evidencia metaanalítica sobre tDCS y rendimiento deportivo.

Un metaanálisis reciente que incluyó 31 estudios con 473 atletas evaluó los efectos agudos de la tDCS anódica sobre el rendimiento deportivo específico (Jiang et al., 2025). Los resultados mostraron un efecto moderado y significativo (SMD = 0.39, IC 95%: 0.23-0.54, $p < 0.001$). El análisis por subgrupos reveló que:

La estimulación de M1 tuvo el efecto más consistente (SMD = 0.32).
La estimulación de la corteza prefrontal (PFC) mostró un efecto moderado (SMD = 0.39).
La tDCS mejoró significativamente el rendimiento de resistencia (SMD = 0.46) y las tareas de habilidad competitiva-colaborativa (SMD = 0.45).
Los parámetros óptimos fueron una intensidad de corriente moderada (1.6-2.0 mA) y una duración de estimulación de 16-20 minutos.

Este metaanálisis proporciona una base sólida para la aplicación de tDCS en el entrenamiento deportivo, aunque los autores advierten que se necesitan más estudios para explorar los efectos a largo plazo.

15.2.6. Aplicaciones de la estimulación cerebral en el rendimiento deportivo.
Mejora del aprendizaje motor y la adquisición de habilidades.

La evidencia sugiere que la NIBS puede acelerar la adquisición de habilidades deportivas específicas al modular la actividad de las redes neuronales implicadas en el control motor (Deng et al., 2026). En jugadores de baloncesto, la tDCS anódica bilateral sobre M1 facilitó la adquisición y consolidación de habilidades después de la fatiga deportiva, mejorando significativamente la precisión en el tiro (Cohen's $d = 0.54$) y reduciendo los errores en tareas de tiempo de reacción serial (Cohen's $d \geq 0.50$) (Zhang et al., 2024).

En futbolistas, la tDCS ha demostrado mejorar la fuerza muscular, reducir la fatiga percibida y mejorar el bienestar general (Zhang et al., 2024). La estimulación de la DLPFC ha mejorado la recuperación post-partido y funciones cognitivas como el tiempo de reacción y el aprendizaje motor implícito (Zhang et al., 2024).

Un metaanálisis sistemático de Winker et al. (2024) que evaluó los efectos agudos de la tDCS sobre M1 en adultos sanos encontró que la tDCS anódica mejora significativamente el rendimiento en tareas motoras, aunque con una heterogeneidad considerable entre estudios. Los

autores señalan que esta variabilidad se debe a diferencias en los protocolos de estimulación, las poblaciones estudiadas y las tareas evaluadas.

Mejora de la fuerza muscular y la resistencia.

La NIBS también ha mostrado efectos positivos sobre la fuerza muscular y la resistencia, posiblemente a través de la modulación de la excitabilidad corticospinal y la optimización del reclutamiento de unidades motoras (Deng et al., 2026). La tDCS sobre M1 ha demostrado aumentar la producción de fuerza en contracciones voluntarias máximas y mejorar el rendimiento en tareas de resistencia submáxima.

Una revisión sistemática de Bioengineering (2024) sobre tDCS y rendimiento de resistencia de extremidades inferiores encontró que la tDCS mejoró efectivamente el tiempo hasta el fallo (TTF) , aumentó la acumulación de lactato sanguíneo y redujo la percepción subjetiva del esfuerzo durante el ciclismo (Bioengineering, 2024).

En deportes de resistencia, la estimulación cerebral repetida podría condicionar las redes cerebrales para resistir mejor la fatiga o la incomodidad, reforzando las vías que inhiben las señales negativas (Zhang et al., 2024). La rTMS combinada con estimulación periférica también ha acelerado la recuperación del dolor muscular de aparición tardía (DOMS), mejorando la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), un marcador de recuperación parasimpática (Moscatelli et al., 2025).

15.2.7. Optimización de la atención y la toma de decisiones.

La NIBS puede modular la actividad de la DLPFC, una región clave para la atención, el control ejecutivo y la toma de decisiones (Deng et al., 2026; Moscatelli et al., 2025). La rTMS de alta frecuencia sobre la DLPFC ha demostrado mejorar la coordinación motora y reducir los umbrales motores, lo que sugiere una mejora en la preparación cortical y la integración sensoriomotora (Moscatelli et al., 2025).

En deportes que requieren una toma de decisiones rápida bajo presión (fútbol, baloncesto, tenis), la optimización de la función prefrontal podría traducirse en una mejor lectura del juego, una anticipación más precisa y una reducción de los errores tácticos.

Regulación emocional y manejo de la presión.

El neurofeedback EEG ha demostrado ser una herramienta eficaz para el entrenamiento de la regulación emocional y la resiliencia mental en deportistas de élite (Mesfen, 2026). El protocolo "Cognitive Armor", desarrollado específicamente para deportistas de deportes de precisión, entrena a los atletas para aumentar la relación entre el ritmo sensoriomotor (SMR) y las ondas beta de alta frecuencia, un patrón neural asociado con un estado de rendimiento óptimo (Mesfen, 2026).

En un ensayo controlado aleatorizado con 45 atletas de élite, el grupo que recibió neurofeedback mostró una capacidad significativamente mayor para aumentar la relación SMR/beta-alta en comparación con los grupos de control, y presentó una degradación del rendimiento significativamente menor bajo condiciones de alta presión (Mesfen, 2026). Estos beneficios se mantuvieron en el seguimiento a los 3 meses, lo que sugiere que el neurofeedback puede proporcionar mejoras duraderas en la resiliencia mental y la prevención del "choking" bajo presión.

Otro estudio con futbolistas de élite (n = 41) demostró que el entrenamiento de neurofeedback alfa en grupos produjo un aumento del 34% en la actividad alfa asociada con el entrenamiento, mejorando el rendimiento en tareas de cambio de tarea y rotación mental (van Boxtel et al., 2024). Además, mejoró la duración del sueño autoinformada y las puntuaciones en el cuestionario "Being in Shape" (sensación de control y fluidez).

15.2.8. Aplicaciones en la recuperación y rehabilitación de lesiones.

Conmociones cerebrales y recuperación neurológica.

La rTMS ha mostrado potencial para restaurar la regulación prefrontal después de una conmoción cerebral, acelerando la recuperación de las redes de control ejecutivo y motor implicadas tanto en la rehabilitación como en el rendimiento deportivo (Moscatelli et al., 2025). Dado que las conmociones cerebrales son una de las lesiones neurológicas más frecuentes en deportes de contacto, la NIBS podría ofrecer una vía para acelerar el retorno seguro al juego.

La rTMS, al ser una técnica segura y no farmacológica, podría utilizarse como un complemento para el tratamiento, la recuperación o posiblemente la optimización del rendimiento en atletas con antecedentes de lesiones neurológicas (Moscatelli et al., 2025).

Recuperación de lesiones musculoesqueléticas.

Las lesiones musculoesqueléticas (esguinces, roturas ligamentarias, desgarros musculares) no solo afectan a los tejidos periféricos, sino que también alteran la comunicación entre el sistema nervioso y los músculos, afectando el control motor y la propiocepción (Deng et al., 2026). La NIBS puede desempeñar un papel en la reeducación neuromuscular, facilitando la recuperación de patrones de movimiento funcionales y previniendo compensaciones que podrían conducir a nuevas lesiones.

Un estudio controlado aleatorizado con 62 pacientes con lesiones deportivas de rodilla encontró que la combinación de rehabilitación temprana y rTMS produjo mejores resultados en la función articular y los marcadores inflamatorios en comparación con la rehabilitación sola (Feng et al., 2025). Los pacientes que recibieron rTMS mostraron menor frecuencia e intensidad del dolor, mejor movilidad de la rodilla sin dolor y puntuaciones superiores en la escala Lysholm ($p < 0.05$).

La combinación de rTMS con estimulación periférica ha acelerado la recuperación del DOMS, mejorando la VFC y otros marcadores de recuperación autónoma (Moscatelli et al., 2025). Un ensayo clínico aleatorizado reciente (Keriven et al., 2025) encontró que la estimulación electromagnética combinada (transcraneal y periférica) influye positivamente en las respuestas del sistema nervioso autónomo en atletas jóvenes con DOMS.

Neurofeedback y recuperación psicológica.

El neurofeedback también puede ser útil en el contexto de la rehabilitación, ayudando a los deportistas a gestionar la ansiedad, la frustración y el miedo a la recaída que suelen acompañar a las lesiones prolongadas (Mesfen, 2026). Al entrenar la autorregulación de la actividad cerebral, los atletas pueden desarrollar una mayor resiliencia emocional y una actitud más positiva hacia el proceso de recuperación.

Neurofeedback y entrenamiento mental en el deporte.

Fundamentos del neurofeedback deportivo.

El neurofeedback se basa en el principio de que los deportistas pueden aprender a modular voluntariamente su actividad cerebral cuando reciben retroalimentación en tiempo real sobre sus patrones neurales (Mesfen, 2026). Mediante el uso de electroencefalografía (EEG), se registran las ondas cerebrales y se proporciona información visual o auditiva que indica al deportista cuándo está en un estado neural óptimo para el rendimiento (Mesfen, 2026).

El entrenamiento con neurofeedback se ha utilizado para mejorar la atención, el control motor y la regulación de la ansiedad en atletas de élite (Mesfen, 2026). Un metaanálisis reciente encontró un efecto moderadamente positivo del entrenamiento con neurofeedback en tareas motoras deportivas, con un Hedges's g de 0.78 (intervalo de confianza del 95%: 0.49–1.07) (Mesfen, 2026).

15.2.9. Protocolos específicos para deportistas.

El protocolo "Cognitive Armor" es un ejemplo de intervención de neurofeedback diseñada específicamente para deportistas de élite (Mesfen, 2026). Este protocolo entrena a los atletas para aumentar la relación entre el ritmo sensoriomotor (SMR, 12-15 Hz) y las ondas beta de alta frecuencia (22-30 Hz), un patrón neural asociado con un estado de rendimiento óptimo caracterizado por una atención enfocada y una baja ansiedad.

Los resultados del ensayo controlado aleatorizado con 45 atletas de élite mostraron que el grupo de neurofeedback mejoró significativamente en la capacidad de aumentar la relación SMR/beta-alta en comparación con los grupos de control, y presentó una degradación del rendimiento significativamente menor bajo condiciones de alta presión (Mesfen, 2026). Estos hallazgos proporcionan evidencia prometedora de que el neurofeedback basado en EEG puede ser una intervención superior para desarrollar la resiliencia mental y prevenir la disminución del rendimiento en atletas de élite.

El estudio de van Boxtel et al. (2024) demostró que el entrenamiento de neurofeedback alfa es factible en grupos de hasta 13 atletas simultáneamente utilizando dispositivos portátiles con conexión Bluetooth. Esto abre la posibilidad de implementar neurofeedback en deportes de equipo, superando las limitaciones de las sesiones individuales tradicionales.

15.2.10. Aplicaciones en deportes de precisión.

El neurofeedback ha mostrado ser especialmente útil en deportes de precisión (tiro, golf, tiro con arco), donde el control de la atención y la regulación emocional son cruciales para el rendimiento. El entrenamiento con neurofeedback SMR ha demostrado mejorar la velocidad de procesamiento cognitivo y el tiempo de respuesta motora en tiradores, lo que podría traducirse en un mejor rendimiento en competición (Mesfen, 2026).

Tecnologías emergentes: tACS, tFUS y TIS.

Estimulación transcraneal de corriente alterna (tACS).

La tACS utiliza corrientes alternas a frecuencias específicas para sincronizar las oscilaciones neuronales, modulando la conectividad funcional entre regiones cerebrales (Qi et al., 2024). A diferencia de la tDCS, que modifica la excitabilidad de forma polaridad-dependiente, la tACS actúa mediante el arrastre de oscilaciones neuronales (entrainment), alineando los ritmos cerebrales endógenos con la frecuencia de estimulación externa.

La evidencia sobre tACS en el deporte es aún limitada y mixta. Un estudio de 2024 encontró que la tACS aplicada a M1 durante múltiples días no mejoró el aprendizaje motor en una tarea compleja en mayor medida que la práctica sola (Bioengineering, 2024). Sin embargo, otros estudios han demostrado que la estimulación de M1 con tACS (unilateral y bilateral) puede mejorar el rendimiento motor en la prueba de tablero de Purdue, con efectos sostenidos de hasta 60 minutos (Frontiers, 2024).

15.2.11. Estimulación transcraneal con ultrasonido focalizado (tFUS) y estimulación por interferencia temporal (TIS).

El campo de la NIBS está evolucionando rápidamente con el desarrollo de nuevas modalidades que ofrecen una mayor precisión espacial y temporal (Qi et al., 2024). La estimulación transcraneal con ultrasonido focalizado (tFUS) y la estimulación por interferencia temporal (TIS) permiten la estimulación no invasiva de estructuras cerebrales profundas, superando las limitaciones de las técnicas tradicionales que se limitan principalmente a la corteza (Qi et al., 2024).

Estas tecnologías emergentes prometen elevar el rendimiento deportivo, acelerar la investigación en ciencias del deporte y mejorar la recuperación de lesiones relacionadas con el deporte y afecciones neurológicas (Qi et al., 2024). Sin embargo, su aplicación en el deporte aún se encuentra en una fase muy temprana y requerirá una validación rigurosa antes de su uso generalizado.

15.2.12. Limitaciones, desafíos metodológicos y consideraciones éticas.

Heterogeneidad de los estudios y falta de estandarización.

A pesar de los resultados prometedores, la evidencia sobre la eficacia de la NIBS en el deporte sigue siendo limitada y heterogénea (Deng et al., 2026). Los estudios presentan una gran variabilidad en los parámetros de estimulación (intensidad, duración, frecuencia, localización), los diseños experimentales, las poblaciones de estudio y las medidas de resultado. Esta heterogeneidad dificulta la comparación entre estudios y la extracción de conclusiones sólidas.

La mayoría de los estudios tienen tamaños muestrales pequeños (a menudo menos de 30 participantes por grupo), lo que reduce el poder estadístico y limita la generalización de los hallazgos a poblaciones más amplias, incluyendo atletas profesionales, jóvenes o mujeres (Zhang et al., 2024). Además, los participantes varían ampliamente en edad, nivel de habilidad y experiencia deportiva, lo que introduce una variabilidad adicional.

Efectos placebo y cegamiento.

El cegamiento en los estudios de NIBS es un desafío particular, ya que los participantes pueden percibir las sensaciones asociadas con la estimulación activa (hormigueo, picazón), lo que puede influir en sus expectativas y en los resultados. La falta de un cegamiento adecuado puede exagerar los efectos reportados. Se necesitan diseños de estudio más rigurosos, incluyendo condiciones de simulación (sham) más efectivas y tamaños muestrales más grandes, para confirmar los hallazgos preliminares.

Neurodopaje y equidad en la competición.

El uso de técnicas de NIBS para mejorar el rendimiento deportivo plantea importantes cuestiones éticas relacionadas con la equidad y la integridad de la competición (Deng et al., 2026). El término "neurodopaje" se ha acuñado para describir el uso de la estimulación cerebral con el fin de obtener una ventaja competitiva injusta.

Aplicando el Código de la Agencia Mundial Antidopaje (WADA) de 2021, algunos autores argumentan que la tDCS ya satisface 2 de los 3 criterios para la prohibición —a saber, el potencial de mejora del rendimiento y la violación del espíritu deportivo— mientras que no cumple el tercer criterio, ya que los protocolos estándar plantean un riesgo mínimo para la salud (Chmiel, 2025). Sin embargo, el debate sobre su regulación está en curso.

A diferencia de las sustancias farmacológicas, las técnicas de NIBS no son detectables mediante los métodos de control antidopaje actuales, lo que plantea un desafío para los organismos reguladores. La falta de estandarización de los protocolos y la escasez de ensayos a gran escala limitan la generalización de los hallazgos actuales y dificultan el establecimiento de directrices claras (Deng et al., 2026).

La Agencia Mundial Antidopaje (WADA) aún no ha incluido las técnicas de NIBS en su lista de sustancias y métodos prohibidos, aunque el debate sobre su regulación está en curso. Mientras que la rTMS está aprobada por la FDA para indicaciones psiquiátricas, su uso en el

deporte sigue siendo de investigación y debe limitarse a entornos terapéuticos o de investigación (Moscatelli et al., 2025).

15.2.13. Seguridad y efectos a largo plazo.

Aunque las técnicas de NIBS se consideran generalmente seguras en el contexto clínico, los efectos a largo plazo de la estimulación cerebral repetida en atletas sanos no se conocen completamente (Deng et al., 2026). La falta de protocolos estandarizados adaptados a los atletas y la escasez de ensayos a gran escala limitan la generalización de los hallazgos actuales y dificultan la evaluación de los riesgos potenciales.

Tabla 2.

Desafíos éticos y metodológicos de la estimulación cerebral en el deporte

Desafío	Descripción	Implicaciones
Neurodopaje	Uso de NIBS para obtener una ventaja competitiva injusta	Cuestiona la equidad y la integridad de la competición; no detectable por los métodos de control antidopaje actuales
Heterogeneidad de protocolos	Gran variabilidad en los parámetros de estimulación entre estudios	Dificulta la comparación de resultados y el establecimiento de directrices claras
Tamaños muestrales pequeños	La mayoría de los estudios tienen menos de 30 participantes por grupo	Limita el poder estadístico y la generalización de los hallazgos
Falta de cegamiento	Dificultad para enmascarar las sensaciones de la estimulación activa	Puede exagerar los efectos debido a las expectativas de los participantes
Efectos a largo plazo desconocidos	Falta de estudios sobre los efectos de la estimulación cerebral repetida en atletas sanos	Riesgo potencial de efectos adversos no identificados
Falta de regulación	Ausencia de directrices claras de los organismos deportivos	Dificulta la implementación ética y segura en el deporte de alto rendimiento

15.2.14. Perspectivas futuras y tecnologías emergentes.

Nuevas modalidades de estimulación cerebral.

El campo de la NIBS está evolucionando rápidamente, con el desarrollo de nuevas modalidades que ofrecen una mayor precisión espacial y temporal (Qi et al., 2024). La estimulación transcraneal con ultrasonido focalizado (tFUS) y la estimulación por interferencia temporal (TIS) permiten la estimulación no invasiva de estructuras cerebrales profundas, superando las limitaciones de las técnicas tradicionales que se limitan principalmente a la corteza (Qi et al., 2024).

Estas tecnologías emergentes prometen elevar el rendimiento deportivo, acelerar la investigación en ciencias del deporte y mejorar la recuperación de lesiones relacionadas con el deporte y afecciones neurológicas (Qi et al., 2024). Sin embargo, su aplicación en el deporte aún se encuentra en una fase muy temprana y requerirá una validación rigurosa antes de su uso generalizado.

Personalización de los protocolos de estimulación.

El futuro de la NIBS en el deporte probablemente implicará un enfoque más personalizado, basado en las características individuales de cada atleta (edad, sexo, nivel de entrenamiento, perfil neurofisiológico). La combinación de técnicas de neuroimagen (fMRI, EEG) con la estimulación cerebral podría permitir una modulación más precisa y efectiva de las redes neuronales implicadas en el rendimiento deportivo.

Integración con el entrenamiento convencional.

Es probable que el uso más efectivo de la NIBS en el deporte sea como un complemento del entrenamiento convencional, y no como un sustituto. La estimulación cerebral podría utilizarse para "preparar" el cerebro para el aprendizaje, potenciando los efectos de la práctica repetida y la retroalimentación (Zhang et al., 2024). La combinación de tDCS con una sesión de entrenamiento motor puede conducir a mejoras más pronunciadas en la habilidad o la fuerza que el entrenamiento solo, y estas ganancias pueden persistir a medida que las redes cerebrales se han "preparado" en un estado más plástico y receptivo al aprendizaje (Zhang et al., 2024).

15.3. CONCLUSIONES

Las terapias complementarias basadas en neurociencia, particularmente las técnicas de estimulación cerebral no invasiva, representan una frontera prometedora en la optimización del rendimiento deportivo y la recuperación de lesiones. La evidencia actual indica que la tDCS, la rTMS y el neurofeedback pueden modular la actividad neural y promover la neuroplasticidad,

mejorando el aprendizaje motor, la fuerza muscular, la resistencia, la atención, la toma de decisiones y la regulación emocional en atletas (Deng et al., 2026; Mesfen, 2026; Zhang et al., 2024).

La tDCS anódica sobre la corteza motora primaria ha demostrado facilitar la adquisición y consolidación de habilidades motoras, especialmente después de la fatiga deportiva, mejorando la precisión en el tiro y reduciendo los errores en tareas de tiempo de reacción serial (Zhang et al., 2024). Un metaanálisis reciente confirma un efecto moderado y significativo de la tDCS anódica sobre el rendimiento deportivo específico (SMD = 0.39), con efectos particularmente robustos en el rendimiento de resistencia y en tareas de habilidad competitiva-colaborativa (Jiang et al., 2025).

La rTMS de alta frecuencia sobre la DLPFC ha mejorado la coordinación motora en jugadores de voleibol y ha acelerado la recuperación del DOMS (Moscatelli et al., 2025). La combinación de rehabilitación temprana y rTMS ha demostrado mejores resultados en la función articular y los marcadores inflamatorios en pacientes con lesiones deportivas de rodilla (Feng et al., 2025).

El neurofeedback ha demostrado ser una intervención eficaz para desarrollar la resiliencia mental y prevenir la disminución del rendimiento bajo presión en atletas de élite (Mesfen, 2026). El entrenamiento de neurofeedback alfa en grupos ha mostrado ser factible y efectivo en futbolistas de élite, mejorando el rendimiento cognitivo y el bienestar autoinformado (van Boxtel et al., 2024).

Sin embargo, el campo enfrenta desafíos significativos. La heterogeneidad de los diseños de estudio y los protocolos de estimulación, junto con las preocupaciones éticas no resueltas sobre la autonomía y la equidad de los atletas, continúan limitando la adopción generalizada (Deng et al., 2026). Se necesitan más investigaciones para aclarar los mecanismos de acción, estandarizar los protocolos y establecer directrices éticas sólidas que salvaguarden la seguridad y la integridad de los atletas y la competencia justa (Deng et al., 2026).

El debate sobre el "neurodopaje" y la equidad en la competición plantea preguntas fundamentales sobre el futuro de la estimulación cerebral en el deporte. A diferencia de las sustancias farmacológicas, las técnicas de NIBS no son detectables mediante los métodos de control antidopaje actuales, lo que desafía a los organismos reguladores (Deng et al., 2026; Moscatelli et al., 2025).

Desde la perspectiva de la pedagogía de la actividad física y el deporte, la integración de los principios de la neuromodulación en los programas de entrenamiento y rehabilitación ofrece una oportunidad única para formar atletas más conscientes, resilientes y adaptables. Sin embargo, este enfoque debe ir acompañado de una sólida formación ética y de una comprensión profunda de las limitaciones y los riesgos asociados con estas tecnologías emergentes.

El futuro de la neurorrehabilitación y el entrenamiento deportivo dependerá, en gran medida, de la capacidad de la comunidad científica y deportiva para navegar por estas complejidades, equilibrando la promesa de la innovación tecnológica con el compromiso con la salud, la equidad y la integridad humana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chmiel, J. (2025). Transcranial direct current stimulation (tDCS): A new, (still) legal form of "neurodoping" in sports? *Advances in Clinical and Experimental Medicine*. Publicación electrónica anticipada.

Deng, J., Chen, Q., Luo, L., Wang, Q., Lv, Z., Luo, X., & Liang, J. (2026). Noninvasive brain stimulation and athletic performance: a critical narrative review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation, 18*(1), 71. https://doi.org/10.1186/s13102-025-01455-1[reference:33][reference:34]

Feng, S., Shi, X., Cao, X., & Zhao, J. (2025). Effect Analysis of Early Rehabilitation Therapy Combined With Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on Postoperative Rehabilitation of Sports Knee Injury. *Sports Medicine and Arthroscopy Review, 33*(2), 43-46. https://doi.org/10.1097/JSA.0000000000000402[reference:35]

Jiang, M., Liu, Y., & Xu, G. (2025). Meta-analysis of the acute effects of anodal transcranial direct current stimulation on athletic performance. *Frontiers in Physiology, 16*, 1631905. https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1631905[reference:36][reference:37]

Keriven, H., Sierra, A. S., et al. (2025). Influence of combined transcranial and peripheral electromagnetic stimulation on the autonomous nerve system on delayed onset muscle soreness in young athletes: a randomized clinical trial. *Journal of Translational Medicine, 23*(1), 306. https://doi.org/10.1186/s12967-025-06238-3[reference:38]

Mesfen, A. D. (2026). The "Cognitive Armor" Protocol: A Neurofeedback Intervention for Enhancing Performance Under Pressure in Elite Athletes. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*. https://doi.org/10.1007/s10484-026-09794-6

Moscatelli, F., et al. (2025). Transcranial Magnetic Stimulation in Sports Performance: Promise, Physiology, and Precaution. *Psychiatric Times*. https://www.psychiatrictimes.com/view/transcranial-magnetic-stimulation-in-sports-performance-promise-physiology-and-precaution

Qi, F., et al. (2024). Advances in non-invasive brain stimulation: enhancing sports performance function and insights into exercise science. *Frontiers in Human Neuroscience, 18*, 1477111. https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1477111[reference:39]

Rosso, C., Brustio, P. R., Manuello, J., & Rainoldi, A. (2025). Neuroplasticity of brain networks through exercise: a narrative review about effect of types, intensities, and durations. *Sports, 13*(8), 280. https://doi.org/10.3390/sports13080280

van Boxtel, G. J. M., Denissen, A. J. J. M., de Groot, J. A., Neleman, M. S., Vellema, J., & Hart de Ruijter, E. M. (2024). Alpha Neurofeedback Training in Elite Soccer Players Trained in Groups. *Applied Psychophysiology and Biofeedback, 49*, 589-602. https://doi.org/10.1007/s10484-024-09654-1[reference:40]

Winker, M., Hoffmann, S., Laborde, S., & Javelle, F. (2024). The acute effects of motor cortex transcranial direct current stimulation on athletic performance in healthy adults: A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Neuroscience, 60*(5), 5086-5110. https://doi.org/10.1111/ejn.16488[reference:41]

Zhang, N., Wei, Y., Yi, L., & Qi, F. (2024). Effects Of Transcranial Direct Current Stimulation On Skill Acquisition After Sports Fatigue In Basketball Players: A Pilot Study. *Medicine & Science in Sports & Exercise, 56*(10S), 761-762. https://doi.org/10.1249/01.mss.0001059072.29488.a0[reference:42]

Bioengineering. (2024). The Effect of Transcranial Direct Current Stimulation on Lower-Limb Endurance Performance: A Systematic Review. *Bioengineering, 11*(11), 1088. https://doi.org/10.3390/bioengineering11111088[reference:43]

Frontiers in Human Neuroscience. (2024). Research progress on the intervention of cognitive function using transcranial alternating current stimulation technology. *Frontiers in Human Neuroscience*.

Bioengineering. (2024). Motor Learning in a Complex Motor Task Is Unaffected by Three Consecutive Days of Transcranial Alternating Current Stimulation. *Bioengineering, 11*(8), 744.

CAPITULO 16: IMPLICACIONES ÉTICAS Y CONSIDERACIONES LEGALES EN EL USO DE TECNOLOGÍAS BASADAS EN NEUROCIENCIA EN EL DEPORTE: ***Autor: Lcdo Juan Miguel Luperón Terry, Ph. D.***

IMPLICACIONES ÉTICAS Y CONSIDERACIONES LEGALES EN EL USO DE TECNOLOGÍAS BASADAS EN NEUROCIENCIA EN EL DEPORTE

ETHICAL IMPLICATIONS AND LEGAL CONSIDERATIONS IN THE USE OF NEUROSCIENCE-BASED TECHNOLOGIES IN SPORT

Autor: Lcdo Juan Miguel Luperón Terry, Ph. D.

Correo: jluperon@utb.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6849-150X

Resumen

El uso creciente de tecnologías basadas en neurociencia en el deporte —como la estimulación cerebral no invasiva (NIBS), el neurofeedback y las interfaces cerebro-computadora— plantea importantes desafíos éticos, legales y sociales. Este capítulo analiza los principios éticos fundamentales que deben guiar la aplicación de estas herramientas: autonomía del deportista, beneficencia, no maleficencia y justicia. Se examinan aspectos clave como el consentimiento informado, la privacidad de los datos neurofisiológicos, el debate sobre el "dopaje tecnológico", los riesgos físicos y psicológicos, la responsabilidad legal de los profesionales, y la necesidad de marcos regulatorios claros. Se discuten también los desafíos emergentes relacionados con interfaces cerebro-máquina, inteligencia artificial y realidad aumentada. Finalmente, se derivan recomendaciones prácticas para entrenadores, instituciones deportivas y organismos reguladores, y se señalan las limitaciones de la investigación actual y futuras direcciones.

Palabras clave: neuroética, neurotecnología, deporte, consentimiento informado, privacidad, dopaje tecnológico, regulación.

Abstract

The increasing use of neuroscience-based technologies in sport—such as non-invasive brain stimulation (NIBS), neurofeedback, and brain-computer interfaces—raises significant ethical, legal, and social challenges. This chapter examines the fundamental ethical principles that should guide the application of these tools: athlete autonomy, beneficence, non-maleficence, and justice. Key issues such as informed consent, the privacy of neurophysiological data, the debate on "technological doping," physical and psychological risks, the legal responsibility of professionals, and the need for clear regulatory frameworks are explored. Emerging challenges

related to brain-machine interfaces, artificial intelligence, and augmented reality are also discussed. Finally, practical recommendations for coaches, sports institutions, and regulatory bodies are derived, and limitations of current research and future directions are outlined.

Keywords: neuroethics, neurotechnology, sport, informed consent, privacy, technological doping, regulation.

16.1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la relación entre la neurociencia y el deporte ha ganado gran relevancia, al permitir comprender cómo el cerebro influye directamente en el movimiento, el aprendizaje y el desempeño físico. Cada acción realizada durante el entrenamiento o la competencia depende de procesos como la atención, la coordinación y la capacidad de tomar decisiones, los cuales afectan de manera constante la ejecución de habilidades deportivas (INEUROCAMPUS, 2025; Rincón, 2022).

En este contexto, el uso de tecnologías basadas en neurociencia ha abierto nuevas oportunidades para mejorar el rendimiento y reducir el riesgo de lesiones, facilitando el análisis de los movimientos y la activación de los músculos de manera más precisa (Cid, 2022). Sin embargo, su aplicación también requiere reflexionar sobre aspectos éticos, legales y educativos, con el fin de garantizar que se respete la autonomía del deportista, se proteja su salud y se mantenga la equidad en la competencia (Cabrera, 2022; Oliva, 2022).

El objetivo principal de este capítulo es analizar los principios éticos y legales que deben guiar el uso de neurotecnologías en el deporte. Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos: (1) describir los fundamentos neurocientíficos y tecnológicos relevantes; (2) explicar los principios éticos fundamentales (autonomía, beneficencia, no maleficencia, justicia); (3) analizar la importancia del consentimiento informado y la privacidad de datos; (4) examinar el debate sobre el dopaje tecnológico; (5) evaluar los riesgos y la responsabilidad legal; (6) discutir la necesidad de regulación y políticas públicas; (7) abordar los desafíos éticos emergentes; y (8) derivar recomendaciones prácticas para entrenadores, deportistas e instituciones.

16.2. DESARROLLO

16.2.1. Fundamentos neurocientíficos y tecnológicos en el deporte.

El estudio de la neurociencia aplicada al deporte permite comprender cómo los procesos cerebrales influyen en la ejecución motriz y el rendimiento atlético. La actividad neuronal está directamente relacionada con la coordinación y la toma de decisiones, de modo que cada acción en el entrenamiento depende de un entramado complejo de señales que conectan el cerebro, la médula espinal y los músculos (INEUROCAMPUS, 2025).

Tecnologías como el neurofeedback, la estimulación cerebral no invasiva (NIBS) —incluyendo la estimulación transcraneal de corriente directa (tDCS) y la estimulación magnética transcraneal repetitiva (rTMS)— y las interfaces cerebro-computadora (ICC) ofrecen herramientas para monitorear y modular la actividad cerebral (Cid, 2022). Estas técnicas facilitan la optimización del rendimiento y la prevención de lesiones, pero su aplicación requiere un entendimiento profundo de los mecanismos neurofisiológicos y un equilibrio entre el entrenamiento físico y la estimulación cognitiva (Cid, 2022; Deng et al., 2026).

La neuroimagen y los sistemas de registro de actividad eléctrica cerebral permiten visualizar patrones de activación neuronal durante la práctica deportiva, contribuyendo a diseñar estrategias de entrenamiento más personalizadas y adaptadas a las necesidades del deportista (Rincón, 2022). Sin embargo, cada intervención debe ser medida y ajustada de forma ética y responsable, considerando los límites individuales y el bienestar integral del atleta.

16.2.2. Principios éticos fundamentales.

La aplicación de tecnologías basadas en neurociencia en el deporte requiere considerar principios éticos fundamentales que garanticen la protección del deportista y la integridad de la competencia (Cabrera, 2022; Oliva, 2022). Cuatro principios básicos, derivados de la bioética, son especialmente relevantes:

Autonomía.

La autonomía se relaciona con el derecho del deportista a decidir sobre su propio cuerpo y mente, considerando la información completa sobre los métodos neurotecnológicos empleados. El consentimiento informado resulta indispensable para asegurar que la participación sea voluntaria y consciente, evitando presiones institucionales o sociales que comprometan la libre elección del atleta (Gesellschaft, 2021).

Beneficencia.

La beneficencia exige que cualquier intervención busque el bienestar del deportista y maximice los beneficios potenciales. Esto implica un conocimiento profundo de los efectos a corto y largo plazo de las tecnologías aplicadas, de modo que la optimización del rendimiento no se logre a costa de la salud física o psicológica de los atletas (Cabrera, 2022).

No maleficencia.

El principio de no maleficencia ("primero, no dañar") obliga a minimizar los riesgos de daño. Los profesionales deben conocer los posibles efectos adversos de la estimulación cerebral y otros procedimientos, así como los factores de variabilidad individual que pueden influir en la respuesta del deportista (Davis, 2014).

Justicia.

La justicia y la equidad competitiva se refieren a garantizar que todos los deportistas tengan acceso a condiciones similares, evitando ventajas tecnológicas que puedan alterar la igualdad de oportunidades (Cabrera, 2022). Los organismos deportivos y las instituciones deben regular la implementación de estas tecnologías, asegurando que no se conviertan en herramientas de exclusión o discriminación.

16.2.3. Consentimiento informado y autonomía del deportista.

El consentimiento informado es un elemento fundamental cuando se aplican tecnologías basadas en neurociencia en el deporte. El deportista debe comprender los riesgos, beneficios y posibles efectos de la intervención, de modo que su participación sea voluntaria y consciente, evitando decisiones impulsivas o presionadas por entrenadores o instituciones (Gesellschaft, 2021; Oliva, 2021).

Este proceso implica explicar de manera clara cómo se emplearán herramientas como el neurofeedback o la estimulación cerebral, además de detallar las posibles repercusiones físicas y cognitivas. El deportista debe tener la capacidad de evaluar si desea participar en la intervención, considerando su propia seguridad y bienestar, así como los objetivos de su entrenamiento (Gesellschaft, 2021).

El consentimiento informado adquiere mayor complejidad cuando se trabaja con menores de edad o atletas en formación. Los tutores y entrenadores deben garantizar que la decisión sea

ética y adecuada, de modo que la protección del desarrollo integral del joven prevalezca sobre la búsqueda de resultados inmediatos (Cabrera, 2022).

La transparencia en la comunicación es esencial. Los profesionales deben mantener un diálogo constante con los deportistas sobre los avances, ajustes o posibles efectos secundarios de la tecnología, de manera que la confianza se fortalezca y los atletas se sientan seguros de expresar dudas, inquietudes o rechazo ante cualquier procedimiento que no consideren conveniente (Oliva, 2021).

16.2.4. Privacidad y protección de datos neurofisiológicos.

El uso de tecnologías neurocientíficas en el deporte implica la recopilación de información altamente sensible sobre la actividad cerebral y cognitiva de los atletas. Garantizar la privacidad y protección de estos datos es fundamental. Su manejo responsable evita filtraciones, uso indebido o vulneraciones de la intimidad que puedan afectar la integridad del deportista (Bastianon, 2021; Farah, 2015).

La seguridad de los registros neurofisiológicos requiere protocolos estrictos de almacenamiento y acceso. Solo profesionales autorizados deben poder analizarlos, evitando que terceros obtengan información sobre capacidades cognitivas o patrones de comportamiento, lo que podría generar discriminación, presión o manipulación dentro del contexto competitivo (Bastianon, 2021).

Las normativas de protección de datos personales, tanto nacionales como internacionales (como el GDPR en Europa), ofrecen un marco legal que regula el uso de información biométrica y cerebral. Los profesionales deben cumplir con estándares éticos y legales que protejan los derechos del deportista, garantizando que cada intervención tecnológica se aplique con transparencia y responsabilidad (UNESCO, 2021).

La privacidad no se limita a la confidencialidad de los datos, sino que también incluye el control del deportista sobre qué información se comparte y con quién. Se deben respetar sus derechos individuales, evitar la explotación comercial o mediática y fomentar un entorno de confianza y respeto dentro del deporte (Bastianon, 2021).

16.2.5. Dopaje tecnológico y equidad competitiva

El uso de neurotecnologías para mejorar el rendimiento deportivo ha generado un debate sobre lo que algunos denominan "dopaje tecnológico" (Chuquimarca, 2020; Davis, 2014). La manipulación de la actividad cerebral para obtener una ventaja competitiva plantea interrogantes éticos y legales sobre la autenticidad del logro deportivo y la equidad en la competición.

Aplicando el Código de la Agencia Mundial Antidopaje (WADA), algunos autores argumentan que ciertas técnicas de estimulación cerebral (como la tDCS) ya satisfacen dos de los tres criterios para la prohibición: el potencial de mejora del rendimiento y la violación del espíritu deportivo, aunque no cumplen el tercer criterio, ya que los protocolos estándar plantean un riesgo mínimo para la salud (Chmiel, 2025).

La prevención del dopaje tecnológico requiere un equilibrio entre innovación y justicia. Las tecnologías deben utilizarse para optimizar el entrenamiento, la rehabilitación y la prevención de lesiones, sin alterar la competencia de manera injusta (Davis, 2014). Es fundamental promover una cultura deportiva donde la ética y el rendimiento estén alineados, y donde la tecnología sirva como apoyo y no como amenaza a la integridad competitiva.

16.2.6. Riesgos físicos, psicológicos y efectos a largo plazo.

El uso de neurotecnologías en el deporte no solo influye en el rendimiento, sino que también tiene implicaciones directas en la integridad física y mental del atleta (Cabrera, 2022). La estimulación cerebral puede alterar la percepción, la fatiga, el equilibrio emocional y otros procesos cognitivos, por lo que cada intervención debe ser planificada cuidadosamente, garantizando que los beneficios superen los riesgos.

Los efectos a corto y largo plazo de la estimulación cerebral requieren un seguimiento constante. Alteraciones cognitivas, cambios en la concentración o modificaciones del estado de ánimo pueden afectar el desempeño y la salud del deportista. La variabilidad individual hace que cada atleta reaccione de manera distinta, por lo que es esencial un monitoreo personalizado y ético (Davis, 2014).

La intervención neurotecnológica debe integrarse con la preparación física y psicológica, de modo que se fortalezca la resistencia, la coordinación y la toma de decisiones sin comprometer la salud. También deben considerarse los factores de recuperación y descanso, permitiendo un

enfoque holístico que combine mente y cuerpo para un entrenamiento responsable (Cabrera, 2022).

16.2.7. Responsabilidad legal de entrenadores y profesionales.

La aplicación de tecnologías neurocientíficas en el deporte requiere que entrenadores y profesionales de la salud comprendan la responsabilidad legal que conlleva su uso. Cualquier intervención indebida podría derivar en daños físicos o psicológicos, de modo que la preparación técnica y la formación ética son esenciales para proteger tanto al deportista como a los profesionales (ITCD, 2021).

La normativa nacional e internacional establece criterios para el uso seguro de estas tecnologías, indicando protocolos, límites y sanciones en caso de incumplimiento. Los responsables deben mantenerse actualizados y cumplir con estándares que garanticen la seguridad, la equidad y el respeto por los derechos del atleta (ITCD, 2021).

La responsabilidad legal también incluye aspectos de documentación, consentimiento informado y registro de intervenciones. Cada procedimiento debe quedar respaldado, permitiendo la trazabilidad y asegurando que cualquier eventualidad pueda ser evaluada desde un marco ético y jurídico, protegiendo a todas las partes involucradas (Bastianon, 2021).

16.2.8. Regulación, políticas públicas y marco normativo.

El desarrollo de políticas públicas y regulaciones específicas es esencial para el uso responsable de tecnologías neurocientíficas en el deporte. Estos marcos permiten definir límites claros, criterios de seguridad y protocolos de actuación, protegiendo la salud del atleta y evitando el uso indebido o competitivo injusto de estas herramientas (Chuquimarca, 2020; Alexandra, 2021).

Los marcos regulatorios deben incluir la participación de organismos deportivos (como la WADA, el COI), autoridades de salud y comités de bioética. La supervisión debe ser integral y cada intervención tecnológica debe cumplir con estándares éticos y legales, fomentando un equilibrio entre innovación, rendimiento y derechos del deportista (UNESCO, 2021).

La regulación también implica la creación de normativas sobre entrenamiento, consentimiento informado y protección de datos. Los profesionales que aplican estas tecnologías deben tener

directrices claras para actuar con responsabilidad, evitando riesgos legales, físicos o psicológicos que puedan comprometer a los atletas (Alexandra, 2021).

Las políticas públicas deben contemplar programas de educación y capacitación para entrenadores, profesionales de la salud y deportistas, promoviendo un uso seguro y ético de la neurotecnología, así como la inclusión de todos los participantes en el desarrollo y aplicación de estas innovaciones (Chuquimarca, 2020).

16.2.9. Inclusión, equidad y acceso a neurotecnologías.

El acceso a tecnologías basadas en neurociencia no siempre es equitativo. Atletas de alto rendimiento suelen disponer de recursos que no están disponibles en el deporte formativo o adaptado, de manera que la desigualdad puede afectar la competencia y generar diferencias significativas en el desarrollo de habilidades y rendimiento (Iván, 2020).

La equidad debe ser un criterio central en la implementación de neurotecnologías. Es necesario establecer mecanismos que garanticen que todos los deportistas, independientemente de su nivel, condición económica o capacidad, tengan acceso a estas herramientas cuando sea clínicamente indicado o formativamente relevante (Iván, 2020).

La inclusión también implica adaptar las tecnologías para atletas con discapacidad, asegurando que la neurociencia sirva para potenciar la participación y el desarrollo de todos los deportistas, sin generar barreras adicionales (Cabrera, 2022).

16.2.10. Desafíos éticos emergentes.

El avance de la neurotecnología aplicada al deporte plantea dilemas emergentes relacionados con la autenticidad del rendimiento, la manipulación de habilidades cognitivas y la integración de interfaces cerebro-máquina (ICC) y realidad aumentada (EIDAC, 2020). Estas tecnologías pueden potenciar habilidades, pero también generan interrogantes sobre identidad, autonomía y control del propio rendimiento.

La realidad aumentada y los sistemas de estimulación avanzada pueden mejorar la toma de decisiones o la percepción espacial, pero su uso plantea preguntas sobre si el rendimiento sigue siendo "natural" o si se convierte en un producto de la tecnología (EIDAC, 2020). Los profesionales deben anticipar estos riesgos y establecer límites éticos claros, garantizando que la innovación respete la integridad del atleta.

Los retos futuros implican la necesidad de actualización constante de las regulaciones, políticas públicas y protocolos profesionales. Los avances científicos no deben quedar fuera del marco ético y legal, asegurando que cada nueva tecnología se aplique con responsabilidad, equidad y seguridad (EIDAC, 2020).

16.2.11. Aplicaciones prácticas y recomendaciones.

A partir de la evidencia revisada, se proponen las siguientes recomendaciones prácticas:

1. Implementar protocolos de consentimiento informado adaptados a la neurotecnología, que expliquen claramente los riesgos, beneficios y alternativas en un lenguaje accesible para el deportista (Gesellschaft, 2021).
2. Establecer sistemas de protección de datos neurofisiológicos que cumplan con las normativas de privacidad (GDPR, leyes locales) y que otorguen al deportista control sobre su información (Bastianon, 2021).
3. Crear comités de bioética deportiva en federaciones y clubes para evaluar la pertinencia y seguridad de las intervenciones neurotecnológicas (UNESCO, 2021).
4. Capacitar a entrenadores y profesionales en principios de neuroética, responsabilidad legal y manejo de tecnologías emergentes (ITCD, 2021).
5. Promover la transparencia y el debate sobre el dopaje tecnológico, involucrando a deportistas, entrenadores y organismos reguladores en la definición de límites éticos (Davis, 2014).
6. Fomentar la investigación sobre los efectos a largo plazo de la neuroestimulación en atletas, así como sobre las diferencias individuales en la respuesta a estas tecnologías (Deng et al., 2026).

Limitaciones de la investigación actual y direcciones futuras.

A pesar del avance en la comprensión de las implicaciones éticas y legales de la neurotecnología en el deporte, existen limitaciones importantes:

La mayoría de los estudios empíricos sobre eficacia de la NIBS se han realizado con muestras pequeñas y en condiciones de laboratorio, lo que limita la generalización a poblaciones atléticas diversas (Deng et al., 2026).

No se han analizado suficientemente los efectos a largo plazo de la estimulación cerebral repetida en atletas sanos.

La regulación internacional sobre neurotecnología en el deporte es todavía incipiente y fragmentada.

No hay consenso sobre qué técnicas constituyen "dopaje tecnológico" y cuáles son intervenciones legítimas.

Faltan estudios sobre la percepción de los propios deportistas sobre la ética de estas tecnologías.

Futuras líneas de investigación deberían explorar: (a) el desarrollo de marcos regulatorios internacionales armonizados; (b) la evaluación de los efectos psicológicos y sociales de la neuroestimulación en atletas; (c) la participación de los deportistas en la definición de políticas éticas; y (d) el impacto de las neurotecnologías emergentes (ICC, IA) en la identidad y autonomía del deportista.

16.3. CONCLUSIONES

La neurociencia aplicada al deporte se consolida como un enfoque que permite comprender de manera más profunda la relación entre el cerebro, el movimiento y el rendimiento. El análisis realizado demuestra que el uso de tecnologías neurocientíficas es capaz de aportar beneficios importantes en la optimización del entrenamiento y la prevención de lesiones, siempre y cuando su aplicación se base en principios éticos como la autonomía, la beneficencia, la justicia y el respeto por la privacidad (Cabrera, 2022; Oliva, 2022).

El consentimiento informado, la protección de datos neurofisiológicos y la prevención del dopaje tecnológico constituyen pilares fundamentales para garantizar que la innovación científica contribuya al desarrollo deportivo sin vulnerar los derechos ni la integridad de los atletas (Gesellschaft, 2021; Bastianon, 2021). La regulación y las políticas públicas deben establecer marcos claros que equilibren la promoción de la excelencia deportiva con la protección de la salud, la equidad y la dignidad humana (UNESCO, 2021; Chuquimarca, 2020).

El rol de entrenadores, profesionales de la salud y organismos reguladores es esencial. Su formación ética y su compromiso con la transparencia determinarán si la neurotecnología se convierte en una herramienta de progreso o en un factor de desigualdad y riesgo. El futuro de la neurociencia en el deporte dependerá de la capacidad de la comunidad deportiva para navegar por estas complejidades, integrando el rigor científico con la reflexión ética y el respeto por los valores del deporte.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexandra, A. (2021). El uso de las TIC en el entrenamiento deportivo. *Revista Cubana de Educación Física y Deporte, 1*(1), 76-85.

Bastianon, S. (2021). Hacia una cultura de salvaguardia: perspectivas comparadas y el camino por recorrer. *Sports Law and Policy Centre*. https://www.sportslawandpolicycentre.com/SAFEGUARDING_ES.pdf

Cabrera, G. (2022). Las neurociencias y su aplicación a la didáctica. *Revista Cubana de Educación Superior, 41*(6), 1028-1042.

Chmiel, J. (2025). Transcranial direct current stimulation (tDCS): A new, (still) legal form of "neurodoping" in sports? *Advances in Clinical and Experimental Medicine*. Publicación electrónica anticipada.

Chuquimarca, J. P. (2020). *Análisis de las políticas públicas y el marco organizacional vinculado al deporte de alto rendimiento de Ecuador*. Tesis de maestría, Universidad Andina Simón Bolívar. https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/7458/1/T3254-MGDE-Rodr%C3%ADguez-Analisis.pdf

Cid, J. (2022). Neurotecnología: interfaz cerebro-computador y protección de datos. *Dialnet*, 11-15.

Davis, N. J. (2014). The ethics of using brain stimulation in sport. *Journal of the Philosophy of Sport, 41*(2), 177-191. https://doi.org/10.1080/00948705.2013.858622

Deng, J., Chen, Q., Luo, L., Wang, Q., Lv, Z., Luo, X., & Liang, J. (2026). Noninvasive brain stimulation and athletic performance: a critical narrative review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation, 18*(1), 71. https://doi.org/10.1186/s13102-025-01455-1

EIDAC. (2020). La investigación multidisciplinaria: una mirada desde la educación, empresa, sociedad y tecnologías. *Editorial EIDAC*, 7-10.

Farah, M. J. (2015). The ethics of cognitive enhancement. *Science, 350*(6263), 840-841. https://doi.org/10.1126/science.aad3286

Gesellschaft, D. G. (2021). Deporte con principios. *Sport for Development*. https://www.sport-for-development.com/imglib/downloads/Manuale/giz-2021-es-manual-deporte-con-principios-ecuador.pdf

INEUROCAMPUS. (2025). Neurociencia y rendimiento deportivo. *INEUROCAMPUS Ediciones, 161*, 1-20. https://www.ineurocampus.com/pdf/ediciones/161/Neurociencia-rendimiento%20deportivo.pdf

ITCD. (2021). Ética deportiva: bases para una actividad justa y respetuosa. *Ciencias Deportivas*. https://cienciasdeportivas.com/etica-deportiva-bases-principios-importancia/

Iván, A. M. (2020). Neurociencia y entrenamiento en el deporte de alto rendimiento. *Revista Iberoamericana de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, 8*(2), 79-90. https://doi.org/10.24310/riccafd.2019.v8i2.669

Oliva, V. C. (2021). La ética en la práctica del deporte y la actividad física. *Revista Peruana de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, 1*(1).

Oliva, V. C. (2022). La ética en la práctica del deporte y la actividad física. *Tesla: Revista de Investigación, 3*(1), 14-18.

Rincón, B. D. (2022). Neuroacción: la neurociencia aplicada a la educación física. *Papeles Salmantinos de Educación, 26*, 11-41. https://doi.org/10.36576/2695-5644.26.11

UNESCO. (2021). *The ethics of neurotechnology: UNESCO's contribution to the global debate*. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378729

WADA. (2021). *World Anti-Doping Code International Standard: Prohibited List*. https://www.wada-ama.org/en/prohibited-list

CAPÍTULO 17: REHABILITACIÓN DE LA MOTRICIDAD FINA Y GRUESA: FUNDAMENTOS TEÓRICOS, EVALUACIÓN E INTERVENCIONES EN TERAPIA OCUPACIONAL Y FISIOTERAPIA:
Dr. Constantino Darroman Hall. Msc.

REHABILITACIÓN DE LA MOTRICIDAD FINA Y GRUESA: FUNDAMENTOS TEÓRICOS, EVALUACIÓN E INTERVENCIONES EN TERAPIA OCUPACIONAL Y FISIOTERAPIA

REHABILITATION OF FINE AND GROSS MOTOR SKILLS: THEORETICAL FOUNDATIONS, ASSESSMENT, AND INTERVENTIONS IN OCCUPATIONAL THERAPY AND PHYSIOTHERAPY

AUTOR: Dr. Constantino Darroman Hall. Msc.

Correo institucional: cdarroman@utb.edu.ec

OCID: https://orcid.org/0000-0002-9714-2894

Resumen

La rehabilitación de la motricidad fina y gruesa constituye un pilar fundamental en el ámbito de la terapia ocupacional y la fisioterapia, orientada a restablecer, mejorar o compensar las habilidades motoras necesarias para el desempeño funcional en las actividades de la vida diaria. La motricidad fina se refiere a los movimientos precisos y coordinados de las manos y los dedos, esenciales para tareas como escribir, vestirse o manipular objetos pequeños. Por su parte, la motricidad gruesa implica el control de los músculos grandes del cuerpo, permitiendo movimientos como caminar, saltar y mantener el equilibrio. El presente documento ofrece una revisión y opinión comprehensiva de los fundamentos teóricos, métodos de evaluación y estrategias de intervención empleadas en la rehabilitación motora. Se analizan las principales condiciones que afectan el desarrollo motor, incluyendo parálisis cerebral, lesiones neurológicas, trastornos del desarrollo y patologías ortopédicas. Asimismo, se examina la evidencia científica que respalda las diversas técnicas terapéuticas, desde terapias tradicionales hasta intervenciones basadas en tecnología y realidad virtual. Los resultados de las investigaciones revisadas demuestran que las intervenciones basadas en terapia ocupacional producen mejoras significativas en la función motora gruesa, la movilidad y el rendimiento ocupacional en poblaciones pediátricas y adultas. Los programas de rehabilitación intensivos, combinados con terapias bimanuales, integración sensorial y

entrenamiento en actividades funcionales, han mostrado efectos positivos medibles en la independencia y calidad de vida de los pacientes.

Palabras clave: motricidad fina, motricidad gruesa, rehabilitación, terapia ocupacional, fisioterapia, función motora.

Abstract

Fine and gross motor rehabilitation constitutes a fundamental pillar of occupational therapy and physical therapy, aimed at restoring, improving, or compensating for the motor skills necessary for functional performance in activities of daily living. Fine motor skills refer to precise, coordinated movements of the hands and fingers, which are essential for tasks such as writing, dressing, or manipulating small objects. Gross motor skills, meanwhile, involve control of the body's large muscle groups, enabling movements such as walking, jumping, and maintaining balance. This document provides a comprehensive review and perspective on the theoretical foundations, assessment methods, and intervention strategies used in motor rehabilitation. It analyzes the main conditions affecting motor development, including cerebral palsy, neurological injuries, developmental disorders, and orthopedic pathologies. Additionally, it examines the scientific evidence supporting various therapeutic techniques, ranging from traditional therapies to interventions based on technology and virtual reality. Results from the reviewed research demonstrate that occupational therapy-based interventions yield significant improvements in gross motor function, mobility, and occupational performance across both pediatric and adult populations. Intensive rehabilitation programs—combined with bimanual therapies, sensory integration, and functional activity training—have shown measurable positive effects on patients' independence and quality of life.

Keywords: fine motor skills, gross motor skills, rehabilitation, occupational therapy, physical therapy, motor function.

17.1. INTRODUCCIÓN

La rehabilitación de la motricidad fina y gruesa representa uno de los campos más relevantes dentro de las disciplinas de terapia ocupacional y fisioterapia, dado que el desarrollo y mantenimiento de las habilidades motoras constituye la base fundamental para la independencia funcional y la participación en las actividades de la vida diaria. Según Case-Smith, Frolek Clark y Schlabach (2013), el rendimiento motor es esencial para que el niño pequeño pueda participar

en el juego, el autocuidado y la interacción social, lo que justifica el énfasis que los terapeutas ocupacionales ponen en el desarrollo motor dentro de sus intervenciones.

El desarrollo motor humano sigue una secuencia predecible que inicia desde el control cefálico y postural, progresando hacia el dominio del tronco, la deambulación y finalmente las destrezas manuales avanzadas. Esta secuencia, aunque universal en su orden, presenta variaciones individuales en velocidad y logros, influenciadas por factores genéticos, ambientales y de oportunidades de práctica. Como señalan Rosenbaum et al. (2002), la comprensión de las curvas de desarrollo motor es fundamental para establecer pronósticos y planificar intervenciones apropiadas en poblaciones con alteraciones del desarrollo.

La importancia de un adecuado desarrollo psicomotor trasciende el ámbito físico, ya que favorece la autonomía personal, la autoestima, el rendimiento académico y la integración social. Cuando se presentan alteraciones en el desarrollo motor, ya sea por condiciones congénitas, adquiridas o degenerativas, la rehabilitación se convierte en una necesidad imperante para minimizar el impacto funcional y mejorar la calidad de vida de los individuos afectados.

El presente documento tiene como objetivo proporcionar una revisión y opinión comprehensiva de los fundamentos teóricos, métodos de evaluación y estrategias de intervención empleadas en la rehabilitación de la motricidad fina y gruesa. Se analizaran las principales condiciones que afectan el desarrollo motor, las técnicas terapéuticas con mayor evidencia científica y las consideraciones prácticas para la implementación de programas de rehabilitación efectivos en diferentes contextos clínicos.

17.2. DESARROLLO

17.2.1. Fundamentos Teóricos de la Motricidad.

Definición y características de la motricidad fina.

La motricidad fina se define como la capacidad de realizar movimientos precisos y coordinados mediante el uso de los músculos pequeños, particularmente aquellos localizados en las manos y los dedos. Estos movimientos son esenciales para la ejecución de tareas que requieren destreza manual, coordinación ojo-mano y control preciso de los dedos. Segun la literatura especializada, las habilidades de motricidad fina incluyen acciones como agarrar objetos, manipular herramientas, vestirse, alimentarse, escribir y realizar actividades que demandan precisión y coordinación.

Los componentes fundamentales de la motricidad fina incluyen: el agarre, que varía desde el agarre palmar global hasta el agarre de pinza fina; la prensión, que implica la capacidad de sostener y manipular objetos con la fuerza adecuada; la manipulación dentro de la mano, que permite mover objetos de los dedos hacia la palma y viceversa; y la coordinación ojo-mano, esencial para guiar los movimientos manuales basándose en la información visual.

El desarrollo de la motricidad fina esta intrínsecamente relacionado con el desarrollo cognitivo, sensorial y perceptual. Los niños exploran su entorno primordialmente a través del tacto y la manipulación de objetos, lo que les permite construir representaciones mentales sobre las propiedades físicas de los objetos, desarrollar la resolución de problemas y establecer las bases para el aprendizaje escolar formal. Como indica Piller y Torrez (2019), las dificultades en motricidad fina tienen una relación directa con los problemas de escritura en niños en edad escolar.

17.2.2. Definición y características de la motricidad gruesa.

La motricidad gruesa se refiere a los movimientos que involucran los músculos grandes del cuerpo, incluyendo aquellos de los brazos, piernas, tronco y pies. Estos movimientos son necesarios para actividades como caminar, correr, saltar, trepar, lanzar, patear y mantener el equilibrio. El control de la motricidad gruesa es fundamental para la movilidad funcional, la exploración del entorno y la participación en actividades recreativas y deportivas.

Los componentes esenciales de la motricidad gruesa incluyen: el tono muscular, que proporciona la base para el control postural y el movimiento; el equilibrio, necesario para mantener posiciones estables y recuperar la estabilidad ante perturbaciones; la propiocepción, que permite la conciencia de la posición y el movimiento del cuerpo en el espacio; la estabilidad articular, crucial para movimientos suaves y controlados; la planificación motora, que implica la organización y secuenciación efectiva de los movimientos; y la integración bilateral, que coordina ambos lados del cuerpo para tareas funcionales.

Según Morris y Bartlett (2004), el Sistema de Clasificación de la Función Motora Gruesa (GMFCS) ha revolucionado la forma de comprender y comunicar los niveles de función motora en poblaciones con parálisis cerebral, proporcionando un marco estandarizado para la clasificación funcional y la planificación de intervenciones.

17.2.3. Desarrollo motor normal.

El desarrollo motor sigue patrones predecibles que se han documentado extensamente en la literatura pediátrica. Durante el primer año de vida, el infante progresa desde el control cefálico hasta el gateo, pasando por hitos como el rolido, la sentada independiente y el arrastre. Entre los 12 y 24 meses, el niño desarrolla la marcha independiente, comienza a trepar escaleras con apoyo y experimenta con diferentes formas de locomoción.

Entre los 2 y 3 años, se observan mejoras significativas en el equilibrio, la coordinación y la velocidad de la marcha. El niño es capaz de correr, saltar en el mismo lugar, patear pelotas y comenzar a pedalear. Los movimientos se vuelven más fluidos y controlados, permitiendo una mayor exploración del entorno y participación en juegos activos.

De los 4 a los 6 años, el desarrollo motor se caracteriza por el refinamiento de las habilidades adquiridas y la preparación para actividades más complejas. El niño desarrolla la capacidad de saltar a la pata coja, lanzar y atrapar pelotas con mayor precisión, y participar en juegos con reglas que requieren coordinación y control motor. Paralelamente, la motricidad fina se desarrolla para permitir el manejo de útiles escolares, la realización de manualidades y el vestido independiente.

17.2.4. Evaluación de la Función Motora.

La evaluación de la función motora constituye el fundamento sobre el cual se construyen los programas de intervención. Un proceso de evaluación comprehensivo debe considerar tanto la motricidad fina como la gruesa, así como los componentes subyacentes que contribuyen al rendimiento motor global. Los terapeutas utilizan una combinación de evaluaciones estandarizadas y no estandarizadas para obtener una comprensión completa de las fortalezas y debilidades del individuo.

Instrumentos de evaluación de motricidad fina.

Entre los instrumentos más utilizados para evaluar la motricidad fina se encuentran: la Escala de Clasificación de la Habilidad Manual (MACS), que clasifica el uso de las manos en actividades cotidianas en cinco niveles; la Medida de Función Motora Gruesa-66 (GMFM-66), aunque diseñada principalmente para motricidad gruesa, incluye ítems relacionados con la función manual; la Prueba de Evaluación de Destrezas Motoras Finas (PDMS-FM), que evalúa el agarre, la integración ojo-mano y la manipulación; y la Escala de Motricidad de Bruininks-

Oseretsky, que proporciona una evaluación comprehensiva de las habilidades motoras finas y gruesas.

Para la evaluación especifica de la escritura y las tareas grafomotoras, se emplean instrumentos como la Escala de Valoración de la Caligrafía (CHES), la Prueba de Minnesota de Operaciones Escritas y la Evaluación de la Velocidad de Escritura. Estas herramientas permiten identificar las áreas específicas de dificultad que impactan el rendimiento escolar y guiar la planificación de intervenciones.

17.2.5. Instrumentos de evaluación de motricidad gruesa.

La evaluación de la motricidad gruesa se beneficia de instrumentos estandarizados que proporcionan medidas objetivas del rendimiento. La Medida de Función Motora Gruesa (GMFM-88 y GMFM-66) es considerada el gold standard para evaluar el cambio en la función motora gruesa en niños con parálisis cerebral. Esta medida evalúa cinco dimensiones: posiciones básicas, caminar, correr y saltar, así como el uso de las extremidades superiores.

El Sistema de Clasificación de la Función Motora Gruesa (GMFCS) proporciona una clasificación de los niveles de función motora en cinco niveles, desde el nivel I (camina sin restricciones) hasta el nivel V (transporte en silla de ruedas con limitaciones significativas). Esta clasificación es útil para la comunicación entre profesionales, la planificación de intervenciones y la investigación.

Otros instrumentos valiosos incluyen: la Escala de Valoración de la Marcha de Gillette, la Prueba de Desempeño Ocupacional para Niños (COPM), que evalúa el desempeño y la satisfacción en actividades ocupacionales; y la Medida de Independencia Funcional para Niños (WeeFIM), que evalúa la independencia en actividades de la vida diaria.

17.2.6. Poblaciones que Requieren Rehabilitación.

La necesidad de rehabilitación de la motricidad fina y gruesa se presenta en diversas poblaciones a lo largo del ciclo vital. Las condiciones neurológicas constituyen una de las principales indicaciones para intervención rehabilitadora. La parálisis cerebral, como la discapacidad motora más común en la infancia, afecta aproximadamente a 2-3 por cada 1,000 nacidos vivos y presenta una amplia gama de manifestaciones motoras que requieren intervención terapéutica especializada.

Las lesiones neurológicas adquiridas, incluyendo traumatismos craneoencefálicos, accidentes cerebrovasculares y tumores cerebrales, pueden resultar en déficits motores significativos que

afectan tanto la motricidad fina como la gruesa. Según Kuhtz-Buschbeck et al. (2003), la recuperación sensoriomotora después de lesiones cerebrales traumáticas en niños requiere intervenciones intensivas que aborden tanto la marcha como las habilidades motoras finas.

Los trastornos del desarrollo, incluyendo el trastorno del espectro autista, el trastorno por déficit de atención e hiperactividad y los trastornos de la coordinación del desarrollo, frecuentemente presentan alteraciones en el procesamiento sensorial y las habilidades motoras que impactan el funcionamiento diario. Los niños con estos diagnósticos se benefician de intervenciones que integran el procesamiento sensorial con el desarrollo motor.

Las condiciones ortopédicas, como la artritis juvenil, las amputaciones y las anomalías congénitas de las extremidades, pueden limitar el funcionamiento motor y requerir rehabilitación para optimizar la función residual y compensar las limitaciones. Asimismo, las condiciones médicas crónicas, como las enfermedades neuromusculares y los trastornos metabólicos, pueden presentar deterioro progresivo de la función motora que requiere intervención continua.

17.2.7. Intervenciones en Terapia Ocupacional.

La terapia ocupacional ofrece un enfoque holístico para la rehabilitación de la motricidad fina y gruesa, centrado en mejorar la capacidad del individuo para participar en actividades significativas y necesarias de la vida diaria. Las intervenciones se basan en el análisis de las demandas de la actividad, las habilidades del individuo y los factores contextuales que influyen en el desempeño.

La terapia de integración sensorial constituye uno de los enfoques fundamentales en la intervención de problemas motores. Esta aproximación se basa en la comprensión de como el sistema nervioso procesa la información sensorial y utiliza actividades que proporcionan entrada vestibular, propioceptiva y táctil para mejorar la regulación sensorial y la organización motora. Las actividades como columpiarse, brincar, comprimir y jugar con materiales texturados se utilizan para proporcionar experiencias sensoriales que facilitan respuestas motoras adaptativas.

El entrenamiento de habilidades motoras finas se enfoca en desarrollar la fuerza, la destreza y la coordinación necesarias para tareas funcionales. Las actividades incluyen ejercicios de agarre y prensión, manipulación de objetos de diferentes tamaños y texturas, actividades de ensartado

y encaje, y tareas de construcción. El uso de juegos y actividades significativas aumenta la motivación y el compromiso del niño con el proceso terapéutico.

La terapia bimanual intensiva (HABIT) y la terapia de inducción de movimiento restricto (CIMT) son intervenciones específicas para niños con hemiplejia. Estas terapias se basan en la evidencia de que la restricción del uso de la extremidad no afectada, combinada con la práctica intensiva de la extremidad afectada, puede producir cambios significativos en el uso funcional de la mano. Según las investigaciones revisadas por Case-Smith et al. (2013), estas intervenciones han demostrado mejoras medibles en el control motor uní manual y bimanual.

Los programas basados en metas (goal-directed programs) representan otro enfoque efectivo, donde el terapeuta y la familia establecen metas funcionales específicas y relevantes para el niño, y las intervenciones se diseñan específicamente para alcanzar esas metas. Este enfoque ha demostrado ser particularmente efectivo para mejorar el desempeño ocupacional y la satisfacción con las actividades diarias.

17.2.8. Intervenciones en Fisioterapia.

La fisioterapia se centra principalmente en la rehabilitación de la motricidad gruesa, aunque también aborda aspectos de la función motora fina cuando estos impactan la movilidad y el funcionamiento global. Los fisioterapeutas utilizan una variedad de técnicas y modalidades para mejorar la fuerza, el equilibrio, la coordinación y la función motora general.

La terapia neurodesarrollo (NDT) ha sido tradicionalmente utilizada para abordar los problemas del tono muscular y los patrones de movimiento anormales en poblaciones neurológicas. Aunque la evidencia sobre su efectividad ha sido mixta, esta aproximación continúa siendo utilizada en muchos contextos clínicos. La terapia se enfoca en inhibir los patrones anormales y facilitar patrones de movimiento más normales a través del posicionamiento y el manejo especifico.

La terapia conductiva, originaria de Hungría, representa un enfoque holístico donde grupos de niños trabajan juntos bajo la dirección de un conductor para realizar actividades diseñadas para mejorar el control de movimientos funcionales. Según Catanese et al. (1995), los programas de terapia conductiva han mostrado mejoras en las habilidades motoras gruesas y finas, así como en las actividades de la vida diaria.

La hipnoterapia y la equino terapia han ganado reconocimiento como intervenciones complementarias para mejorar el control postural, el equilibrio y la función motora gruesa. El

movimiento rítmico del caballo proporciona entrada sensorial propioceptiva y vestibular que puede facilitar respuestas motoras adaptativas. Matusiak-Wieczorek et al. (2020) encontraron que la hipnoterapia mejora significativamente el control del tronco en niños con parálisis cerebral.

Las intervenciones basadas en tecnología, incluyendo la realidad virtual y los videojuegos terapéuticos, han emergido como herramientas prometedoras para la rehabilitación motora. Estas tecnologías proporcionan retroalimentación inmediata, aumentan la motivación y permiten la práctica repetitiva de movimientos funcionales. Las investigaciones de Szturm et al. (2022) y Choi et al. (2021) han demostrado mejoras significativas en el equilibrio, la función motora gruesa y las actividades de la vida diaria con el uso de intervenciones basadas en juegos.

17.2.9. Evidencia Científica.

La evidencia científica que respalda las intervenciones de rehabilitación de la motricidad fina y gruesa ha crecido significativamente en las últimas décadas. Los metaanálisis y revisiones sistemáticas proporcionan información valiosa sobre la efectividad de diferentes aproximaciones terapéuticas.

Un metaanálisis reciente sobre la efectividad de las intervenciones basadas en terapia ocupacional en niños con parálisis cerebral (2025) encontró efectos significativos en la función motora gruesa medida con la GMFM-66 (ES = 0.32, p = 0.04), la movilidad medida con la PEDI (ES = 0.46, p = 0.02), y el desempeño y satisfacción ocupacional medidos con la COPM (ES = 2.63, p = 0.001 y ES = 2.17, p = 0.002 respectivamente). Estos resultados proporcionan evidencia solida de que las intervenciones de terapia ocupacional pueden mejorar significativamente los resultados motores y funcionales en esta población.

Las intervenciones visomotoras para preescolares con retrasos en el desarrollo han demostrado efectos positivos a corto plazo en el rendimiento visomotor. Case-Smith (2000) encontró que los niños con retrasos en motricidad fina que recibieron servicios de terapia ocupacional realizaron ganancias estadísticamente significativas en manipulación, precisión motora, motricidad fina y habilidades visomotoras. El uso del juego y la interacción con pares dentro de las sesiones de terapia predijo los resultados en motricidad fina y visomotora.

La terapia bimanual intensiva y la terapia de inducción de movimiento restricto han acumulado evidencia sustancial de su efectividad. Los estudios han demostrado mejoras en el uso espontaneo de la extremidad afectada durante el juego y las actividades de autocuidado. Aarts

et al. (2011) encontraron que los niños con habilidad manual pobre al inicio parecen ser los mejores respondedores a la CIMT, aunque las mejoras se observan principalmente en la calidad y frecuencia del uso de la mano más que en la automaticidad o fuerza.

Las intervenciones basadas en tecnología, particularmente la realidad virtual y los juegos terapéuticos, han mostrado resultados prometedores. Szturm et al. (2022) reportaron que un programa de ejercicios de doble tarea basado en juegos mejoro significativamente el equilibrio y las puntuaciones de la GMFM-88 en niños con parálisis cerebral. Jha et al. (2021) encontraron que los juegos de realidad virtual combinados con fisioterapia mejoraron el equilibrio, el rendimiento motor grueso y las funciones diarias en niños con parálisis cerebral espástica bilateral.

17.3. CONCLUSIONES

La rehabilitación de la motricidad fina y gruesa representa un área fundamental de la practica en terapia ocupacional y fisioterapia, con un impacto significativo en la independencia funcional y la calidad de vida de las personas con alteraciones del desarrollo motor. La evidencia científica actual respalda la implementación de intervenciones basadas en terapia ocupacional para mejorar la función motora gruesa, la movilidad y el desempeño ocupacional en diversas poblaciones.

Los fundamentos teóricos del desarrollo motor proporcionan el marco necesario para comprender las secuencias normales de desarrollo y las desviaciones que requieren intervención. La evaluación comprehensiva utilizando instrumentos estandarizados es esencial para establecer diagnósticos funcionales, planificar intervenciones apropiadas y documentar los cambios a lo largo del tiempo.

Las intervenciones con mayor evidencia de efectividad incluyen la terapia bimanual intensiva, la terapia de inducción de movimiento restricto, los programas basados en metas funcionales y las intervenciones que integran tecnología como la realidad virtual. Estas aproximaciones comparten características comunes: son intensivas, especificas a la tarea, significativas para el individuo y basadas en la práctica repetitiva de habilidades funcionales.

La colaboración entre profesionales de la salud, familias y educadores es esencial para maximizar los resultados de la rehabilitación. Las intervenciones deben ser individualizadas, considerando las fortalezas y necesidades específicas de cada persona, así como los contextos en los que se desenvuelve. La continua investigación en esta área promete seguir expandiendo

las opciones terapéuticas disponibles y mejorando los resultados para las personas con alteraciones del desarrollo motor.

Es importante reconocer que la rehabilitación motora es un proceso continuo que requiere compromiso, paciencia y adaptación a medida que las necesidades del individuo evolucionan. El enfoque debe mantenerse en la participación funcional y la calidad de vida, más allá de la mera mejora de habilidades motoras aisladas. Solo a través de un enfoque holístico y centrado en la persona se pueden lograr resultados significativos y duraderos en la rehabilitación de la motricidad fina y gruesa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aarts, P. B., Jongerius, P. H., Geerdink, Y. A., van Limbeek, J., & Geurts, A. C. (2011). Modified constraint-induced movement therapy combined with bimanual training in children with unilateral spastic cerebral palsy: A randomized controlled trial. Clinical Rehabilitation, 25(4), 339-349.

Catanese, A. A., Coleman, G. J., King, J. A., & Reddihough, D. S. (1995). Evaluation of an early childhood programme based on principles of conductive education: The Yooralla project. Developmental Medicine & Child Neurology, 37(4), 323-335.

Case-Smith, J. (2000). Effects of occupational therapy services on fine motor and functional performance in preschool children. American Journal of Occupational Therapy, 54(4), 372-380.

Case-Smith, J., Frolek Clark, G. J., & Schlabach, T. L. (2013). Systematic review of interventions used in occupational therapy to promote motor performance for children ages birth-5 years. American Journal of Occupational Therapy, 67(4), 413-424.

Choi, J. Y., Yi, S. H., Ao, L., Tang, X., Xu, X., Shim, D., Yoo, B., Park, E. S., & Rha, D. W. (2021). Virtual reality rehabilitation in children with brain injury: A randomized controlled trial. Developmental Medicine & Child Neurology, 63(4), 480-487.

Dankert, H. L., Davies, P. L., & Gavin, W. J. (2003). Occupational therapy effects on visual-motor skills in preschool children. American Journal of Occupational Therapy, 57(5), 542-549.

George, S. H., Rafiei, M. H., Borstad, A., Adeli, H., & Gauthier, L. V. (2017). Gross motor ability predicts response to upper extremity rehabilitation in chronic stroke. Behavioural Brain Research, 333, 314-322.

Jha, K. K., Karunanithi, G. B., Sahana, A., & Karthikbabu, S. (2021). Randomized trial of virtual reality games and physiotherapy on balance, gross motor performance, and daily functions in children with bilateral spastic cerebral palsy. Somatosensory & Motor Research, 38(2), 117-126.

Kuhtz-Buschbeck, J. P., Hoppe, B., Golge, M., Dreesmann, M., Damm-Stunitz, U., & Ritz, A. (2003). Sensorimotor recovery in children after traumatic brain injury: Analyses of gait, gross motor, and fine motor skills. Developmental Medicine & Child Neurology, 45(12), 821-828.

Lucas, B. R., Elliott, E. J., Coggan, S., Pinto, R. Z., Jirikowic, T., Latimer, J., & Finlay-Jones, A. (2016). Interventions to improve gross motor performance in children with neurodevelopmental disorders: A meta-analysis. BMC Pediatrics, 16(1), 193.

Matusiak-Wieczorek, E., Dziankowska-Zaborszczyk, E., Synder, M., & Borowski, A. (2020). The influence of hippotherapy on sitting posture in children with cerebral palsy. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(18), 6846.

Morris, C., & Bartlett, D. (2004). Gross motor function classification system: Impact and utility. Developmental Medicine & Child Neurology, 46(1), 60-65.

Perez-Marmol, J. M., Garcia-Rios, M. C., Barrero-Garcia, F. J., & Lopez-Lopez, L. (2017). Effectiveness of a fine motor skills rehabilitation program on upper limb disability, manual dexterity, pinch strength, range of fingers motion, performance in activities of daily living, and general self-efficacy in older adults with hand osteoarthritis. Journal of Hand Therapy, 30(2), 198-207.

Piller, A., & Torrez, E. (2019). Defining occupational therapy interventions for children with fine motor and handwriting difficulties. Journal of Occupational Therapy, Schools, & Early Intervention, 12(2), 189-204.

Rosenbaum, P. L., Walter, S. D., Hanna, S. E., Palisano, R. J., Russell, D. J., Raina, P., Wood, E., Bartlett, D. J., & Galuppi, B. E. (2002). Prognosis for gross motor function in cerebral palsy: Creation of motor development curves. JAMA, 288(11), 1357-1363.

Szturm, T., Parmar, S. T., Mehta, K., Shetty, D. R., Kanitkar, A., Eskicioglu, R., & Gaonkar, N. (2022). Game-based dual-task exercise program for children with cerebral palsy: Combined balance, visuomotor, and cognitive training-A feasibility randomized controlled trial. Sensors, 22(3), 761.

Yang, L., Li, S. S., Zhang, G. Y., Wang, M. M., Chen, G. X., & Zhu, D. N. (2021). Effect of rehabilitation training based on ICF-CY core sets on daily living activities in children with cerebral palsy: A prospective randomized controlled study. Zhongguo Dang Dai Er Ke Za Zhi, 23(6), 608-61

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Presentación

El presente glosario tiene como finalidad facilitar la comprensión de los conceptos clave abordados a lo largo de los catorce capítulos que componen esta obra. Los términos han sido organizados por categorías de análisis para permitir una consulta temática eficiente, y dentro de cada categoría se presentan en orden alfabético. Cada definición ha sido redactada con rigor científico y adaptada al contexto deportivo, e incluye, cuando corresponde, la referencia al capítulo donde el término se desarrolla con mayor profundidad.

CATEGORÍA 1: FUNDAMENTOS NEUROBIOLÓGICOS Y CONTROL MOTOR

Axón: Prolongación de la neurona que conduce los impulsos nerviosos desde el soma hacia otras neuronas, músculos o glándulas. Su mielinización acelera la conducción del impulso, favoreciendo respuestas motoras rápidas en el deporte.

Cerebelo: Estructura subcortical ubicada en la fosa posterior del cráneo, responsable de la coordinación, el equilibrio, la precisión del movimiento y la corrección de errores. Participa en el aprendizaje motor y la automatización de gestos técnicos.

Corteza motora primaria (M1): Región de la circunvolución precentral del lóbulo frontal encargada de generar las señales motoras que activan los músculos a través de la vía corticoespinal. Contiene un mapa somatotópico del cuerpo (homúnculo motor).

Corteza prefrontal (CPF): Región cerebral asociada a las funciones ejecutivas, la planificación, la toma de decisiones, el control inhibitorio y la regulación emocional. Es fundamental para la adaptación a situaciones deportivas cambiantes.

Corteza premotora: Área situada rostralmente a M1, implicada en la planificación de movimientos guiados por estímulos externos y en la preparación de la acción motora.

Ganglios basales: Conjunto de núcleos subcorticales (caudado, putamen, globo pálido, núcleo subtalámico, sustancia negra) que participan en la selección y automatización de movimientos, así como en el aprendizaje de hábitos motores.

Homúnculo motor: Representación somatotópica del cuerpo en la corteza motora primaria, donde las partes del cuerpo con mayor precisión motora (manos, cara) ocupan áreas proporcionalmente mayores.

Médula espinal: Estructura del sistema nervioso central que transmite señales entre el cerebro y el cuerpo, y que contiene circuitos reflejos y generadores centrales de patrones (CPGs) para movimientos rítmicos.

Motoneurona: Neurona del asta anterior de la médula espinal que inerva las fibras musculares y es responsable de la contracción muscular. Se distinguen motoneuronas alfa (fibras extrafusales) y gamma (fibras intrafusales).

Neurona: Unidad funcional básica del sistema nervioso, especializada en recibir, procesar y transmitir información mediante señales eléctricas y químicas.

Propiocepción: Percepción de la posición, el movimiento y la tensión del cuerpo en el espacio, mediada por husos musculares, órganos tendinosos de Golgi y receptores articulares. Es esencial para el control postural y la coordinación deportiva.

Sinapsis: Región de comunicación entre dos neuronas o entre una neurona y una célula efectora, donde se transmite el impulso nervioso mediante neurotransmisores.

Sistema nervioso autónomo (SNA): División del sistema nervioso que regula funciones involuntarias (frecuencia cardíaca, respiración, digestión). Se subdivide en simpático (activación) y parasimpático (recuperación).

Sistema nervioso central (SNC): Conformado por el encéfalo y la médula espinal. Procesa la información sensorial, genera respuestas motoras y regula las funciones superiores.

Sistema nervioso periférico (SNP): Conjunto de nervios y ganglios que conectan el SNC con el resto del cuerpo. Incluye los sistemas sensorial y motor.

Vía corticoespinal (tracto piramidal): Principal vía motora descendente que conecta la corteza motora con las motoneuronas espinales, responsable del control voluntario de movimientos finos.

CATEGORÍA 2: FUNCIONES EJECUTIVAS Y COGNICIÓN

Control inhibitorio: Habilidad para suprimir respuestas automáticas, impulsos o distracciones que interfieren con la meta actual. Es esencial para la toma de decisiones deportivas bajo presión.

Flexibilidad cognitiva: Capacidad para cambiar entre diferentes reglas, estrategias o perspectivas según las demandas del entorno. Permite la adaptación táctica en deportes abiertos.

Función ejecutiva: Conjunto de procesos cognitivos de alto nivel (memoria de trabajo, control inhibitorio, flexibilidad cognitiva, planificación) que permiten regular el comportamiento y alcanzar metas.

Memoria de trabajo: Sistema cognitivo que retiene y manipula temporalmente información mientras se realiza una tarea. Es crucial para recordar instrucciones tácticas y actualizar información durante el juego.

Planificación: Proceso ejecutivo que implica la organización anticipada de acciones y recursos para alcanzar un objetivo. En el deporte, permite diseñar estrategias y secuenciar movimientos.

Toma de decisiones: Proceso cognitivo mediante el cual el deportista selecciona una acción entre varias alternativas, basándose en la información percibida y en la experiencia previa.

CATEGORÍA 3: SISTEMAS ENERGÉTICOS Y METABOLISMO

ATP (trifosfato de adenosina): Molécula energética fundamental que impulsa la contracción muscular y los procesos celulares. Se regenera a través de los sistemas energéticos.

Ciclo de Krebs: Vía metabólica aeróbica que oxida acetil-CoA para producir energía en forma de ATP, NADH y $FADH_2$ en la mitocondria.

Fosfocreatina (PCr): Compuesto de alta energía que permite la regeneración rápida de ATP durante los primeros segundos de ejercicio intenso (sistema fosfágeno).

Glucólisis anaeróbica: Vía metabólica que degrada glucosa sin oxígeno, produciendo ATP y lactato. Predomina en esfuerzos de alta intensidad y corta duración (30 s - 2 min).

Homeostasis energética: Equilibrio dinámico entre la ingesta y el gasto energético, regulado por el hipotálamo y señales hormonales.

Lactato: Subproducto de la glucólisis anaeróbica que puede ser utilizado como sustrato energético por músculos, corazón y cerebro. No es un simple desecho metabólico.

Sistema oxidativo: Vía metabólica aeróbica que utiliza glucosa, ácidos grasos y aminoácidos para producir ATP en la mitocondria. Predomina en esfuerzos prolongados (>2 min).

Umbral anaeróbico: Punto de intensidad del ejercicio en el que la producción de lactato supera su eliminación, marcando la transición hacia un predominio anaeróbico.

CATEGORÍA 4: MEMORIA, APRENDIZAJE Y PLASTICIDAD

Aprendizaje motor: Proceso mediante el cual la práctica y la experiencia producen cambios relativamente permanentes en la capacidad para ejecutar habilidades motoras.

Consolidación: Proceso por el cual los recuerdos recién codificados se estabilizan y fortalecen en el sistema nervioso. Se divide en consolidación sináptica (horas) y sistémica (semanas-meses).

Depresión a largo plazo (LTD): Debilitamiento duradero de la transmisión sináptica tras estimulación de baja frecuencia. Contribuye al olvido y a la refinación de circuitos.

Engrama: Huella física de un recuerdo en el cerebro, formada por el fortalecimiento de conexiones sinápticas en grupos neuronales específicos.

Factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF): Proteína que promueve la supervivencia neuronal, la plasticidad sináptica y la neurogénesis. Aumenta con el ejercicio aeróbico.

Memoria declarativa (explícita): Memoria consciente de hechos y eventos, que incluye la memoria semántica y la episódica. Depende del hipocampo.

Memoria procedimental (implícita): Memoria inconsciente de habilidades y hábitos ("cómo hacer las cosas"). Depende del estriado, ganglios basales y cerebelo.

Neurogénesis adulta: Generación de nuevas neuronas en el giro dentado del hipocampo adulto, favorecida por el ejercicio aeróbico.

Plasticidad sináptica: Cambio en la eficacia de las conexiones sinápticas en respuesta a la actividad, mediado por LTP y LTD.

Potenciación a largo plazo (LTP): Fortalecimiento duradero de la transmisión sináptica tras estimulación repetida de alta frecuencia. Es el principal mecanismo celular del aprendizaje.

Poda sináptica: Eliminación de conexiones sinápticas no utilizadas, que permite la refinación de circuitos neuronales durante el desarrollo y el aprendizaje.

CATEGORÍA 5: ATENCIÓN, PERCEPCIÓN Y ANTICIPACIÓN

Anticipación: Capacidad de prever la acción del oponente o la trayectoria de un objeto antes de que ocurra, basada en el reconocimiento de patrones y la experiencia.

Atención alternante: Habilidad para cambiar el foco atencional entre diferentes estímulos o tareas según las demandas de la situación.

Atención dividida: Capacidad para procesar múltiples estímulos o realizar varias tareas simultáneamente.

Atención selectiva: Habilidad para concentrarse en estímulos relevantes e inhibir distracciones.

Atención sostenida: Capacidad para mantener la concentración en una tarea durante períodos prolongados.

Choking (ahogo competitivo): Deterioro del rendimiento bajo presión, asociado a un exceso de control consciente y ansiedad.

Eye-tracking: Tecnología que registra los movimientos oculares y los puntos de fijación visual, utilizada para estudiar la percepción en deportistas.

Percepción: Proceso cognitivo que organiza e interpreta la información sensorial para darle significado. En el deporte, permite entender el juego y anticipar acciones.

Visión periférica: Capacidad de detectar estímulos fuera del campo visual central, importante para la lectura del juego en deportes colectivos.

CATEGORÍA 6: ESTRÉS, ANSIEDAD Y EMOCIONES

Amígdala: Estructura del sistema límbico que procesa emociones como el miedo y la ansiedad. Su hiperactivación puede interferir con el rendimiento deportivo.

Ansiedad competitiva: Estado emocional caracterizado por tensión, preocupación y activación fisiológica ante situaciones de competición. Puede ser somática (fisiológica) o cognitiva (pensamientos).

Cortisol: Hormona glucocorticoides liberada por la corteza suprarrenal en respuesta al estrés. Niveles crónicamente elevados afectan la memoria y el sistema inmunológico.

Eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HHA): Sistema neuroendocrino que regula la respuesta al estrés, liberando CRH, ACTH y cortisol.

Estrés agudo: Respuesta temporal del organismo ante un estresor específico. Puede ser adaptativo si se mantiene en niveles moderados.

Estrés crónico: Respuesta prolongada ante estresores repetidos o continuos, que excede la capacidad de recuperación del organismo.

Eustrés: Estrés positivo, motivador y adaptativo, que mejora el rendimiento y la alerta.

Distrés: Estrés negativo, perjudicial, que deteriora la salud y el rendimiento.

Regulación emocional: Conjunto de estrategias cognitivas y conductuales para modular la intensidad y duración de las emociones. Es entrenable y esencial en el deporte.

Serotonina (5-HT): Neurotransmisor asociado al estado de ánimo, el sueño y la percepción del esfuerzo. Su aumento durante el ejercicio prolongado se asocia con fatiga central.

Teoría de la U invertida (Yerkes-Dodson): Modelo que propone una relación curvilínea entre activación (arousal) y rendimiento, con un punto óptimo de activación.

CATEGORÍA 7: FATIGA Y RECUPERACIÓN

Burnout deportivo: Estado de desgaste físico, mental y emocional causado por estrés competitivo prolongado sin recuperación adecuada.

Fatiga central: Reducción de la capacidad del SNC para activar voluntariamente los músculos, mediada por cambios en neurotransmisores y excitabilidad cortical.

Fatiga mental: Estado psicobiológico caracterizado por disminución del rendimiento cognitivo tras esfuerzo mental prolongado. Aumenta la percepción del esfuerzo.

Fatiga periférica: Disminución de la capacidad de generar fuerza a nivel muscular, por depleción de sustratos o acumulación de metabolitos.

Gobernador central: Modelo propuesto por Noakes que sugiere que el cerebro regula el esfuerzo de forma anticipatoria para proteger la homeostasis.

Percepción del esfuerzo (RPE): Sensación subjetiva de cuánta exigencia implica una actividad física. Se mide con la escala de Borg.

Recuperación: Proceso neurobiológico de restauración del equilibrio funcional tras el ejercicio, que incluye la normalización de neurotransmisores y la consolidación de adaptaciones.

Sobreentrenamiento: Síndrome caracterizado por fatiga persistente, disminución del rendimiento y alteraciones emocionales, debido a un desbalance entre carga y recuperación.

Variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC): Marcador del equilibrio autonómico (simpático/parasimpático). Una VFC baja indica estrés acumulado y mala recuperación.

CATEGORÍA 8: LESIONES NEUROLÓGICAS Y NEURORREHABILITACIÓN

Conmoción cerebral: Lesión cerebral traumática leve caracterizada por alteración transitoria de la función cerebral tras un impacto en la cabeza o un movimiento acelerado del cerebro.

Encefalopatía traumática crónica (ETC): Enfermedad neurodegenerativa progresiva asociada a traumatismos craneales repetidos, con acumulación de proteína tau anormal.

Interfaz cerebro-computadora (ICC): Tecnología que permite la comunicación directa entre el cerebro y un dispositivo externo, utilizada en neurorrehabilitación.

Neurorrehabilitación: Conjunto de intervenciones terapéuticas basadas en los principios de la neuroplasticidad y el aprendizaje motor para recuperar funciones alteradas tras una lesión.

Neuropatía periférica: Lesión o disfunción de los nervios periféricos, que puede ser causada por compresión, sobreuso o trauma directo.

Reeducación neuromotora: Proceso terapéutico que busca restaurar patrones de movimiento funcionales mediante la repetición guiada y la retroalimentación sensorial.

Retorno al juego (Return to Play): Protocolo escalonado de reintegración progresiva a la competición tras una lesión, que respeta los tiempos de adaptación neurológica.

Traumatismo craneoencefálico (TCE): Lesión cerebral causada por un impacto externo, que puede ser leve, moderado o grave, con consecuencias cognitivas y motoras.

CATEGORÍA 9: NEUROTECNOLOGÍAS Y ESTIMULACIÓN CEREBRAL

Electroencefalograma (EEG): Técnica que registra la actividad eléctrica del cerebro mediante electrodos colocados en el cuero cabelludo. Se utiliza para evaluar atención y estados mentales.

Estimulación magnética transcraneal repetitiva (rTMS): Técnica de neuromodulación que utiliza pulsos magnéticos para inducir corrientes eléctricas en regiones corticales específicas.

Estimulación transcraneal de corriente alterna (tACS): Técnica que aplica corrientes alternas a frecuencias específicas para sincronizar oscilaciones neuronales.

Estimulación transcraneal de corriente directa (tDCS): Técnica que aplica corriente eléctrica de baja intensidad para modular la excitabilidad cortical. La estimulación anódica aumenta la excitabilidad; la catódica la reduce.

Estimulación transcraneal con ultrasonido focalizado (tFUS): Tecnología emergente que permite estimular estructuras cerebrales profundas con alta precisión espacial.

Neurofeedback: Técnica de biorretroalimentación que permite al deportista aprender a autorregular su actividad cerebral en tiempo real mediante EEG.

Neuroimagen funcional (fMRI): Técnica que mide la actividad cerebral mediante cambios en el flujo sanguíneo, permitiendo identificar regiones activadas durante tareas motoras o cognitivas.

Neuromodulación: Conjunto de técnicas que modifican la actividad neuronal mediante estímulos eléctricos, magnéticos o químicos.

CATEGORÍA 10: ÉTICA, LEGISLACIÓN Y NEURODERECHOS

Consentimiento informado: Proceso mediante el cual el deportista recibe información completa sobre riesgos, beneficios y alternativas de una intervención, y acepta voluntariamente participar.

Dopaje tecnológico (neurodopaje): Uso de neurotecnologías para obtener una ventaja competitiva injusta, que puede violar el espíritu deportivo.

Neuro derechos: Derechos humanos emergentes que protegen la privacidad mental, la identidad personal y el libre albedrío frente al uso indebido de neurotecnologías.

Neuroética: Campo interdisciplinario que estudia las implicaciones éticas, legales y sociales de las neurociencias y sus aplicaciones.

Privacidad de datos neurofisiológicos: Protección de la información sobre la actividad cerebral y cognitiva de los deportistas, que es altamente sensible.

WADA (Agencia Mundial Antidopaje): Organismo internacional encargado de regular y combatir el dopaje en el deporte, incluyendo el debate sobre métodos emergentes como la neuromodulación.

CATEGORÍA 11: CONCEPTOS GENERALES DE NEUROCIENCIA APLICADA

Eficiencia neural: Capacidad de ejecutar tareas con menor activación cerebral, indicativa de un uso más optimizado de los recursos neuronales. Es característica de atletas expertos.

Interocepción: Percepción del estado interno del cuerpo (frecuencia cardíaca, respiración, fatiga). Es esencial para la regulación del esfuerzo y la toma de decisiones.

Neurociencia cognitiva: Disciplina que estudia las bases neurales de los procesos mentales como la atención, la memoria, el lenguaje y la toma de decisiones.

Neuroeducación: Aplicación de los principios neurocientíficos a la educación y la pedagogía, optimizando los procesos de enseñanza-aprendizaje.

Sistema límbico: Conjunto de estructuras cerebrales (amígdala, hipocampo, ínsula, corteza cingulada) implicadas en las emociones, la motivación y la memoria.

Índice alfabético de términos

Para facilitar la consulta, se presenta a continuación un índice alfabético con la categoría correspondiente:

Término	Categoría
Amígdala	6
Ansiedad competitiva	6
Anticipación	5
Aprendizaje motor	4
ATP	3
Atención alternante	5
Atención dividida	5
Atención selectiva	5
Atención sostenida	5
Axón	1
BDNF	4
Burnout deportivo	7
Cerebelo	1

Término	Categoría
Choking	5
Ciclo de Krebs	3
Conmoción cerebral	8
Consentimiento informado	10
Consolidación	4
Control inhibitorio	2
Corteza motora primaria	1
Corteza prefrontal	1
Corteza premotora	1
Cortisol	6
Depresión a largo plazo	4
Distrés	6
Dopaje tecnológico	10
Eficiencia neural	11
EEG	9
Eje HHA	6

Término	Categoría
Engrama	4
Encefalopatía traumática crónica	8
Estrés agudo	6
Estrés crónico	6
Eustrés	6
Eye-tracking	5
Fatiga central	7
Fatiga mental	7
Fatiga periférica	7
Flexibilidad cognitiva	2
Fosfocreatina	3
Función ejecutiva	2
Ganglios basales	1
Glucólisis anaeróbica	3
Gobernador central	7
Homeostasis energética	3

Término	Categoría
Homúnculo motor	1
Interfaz cerebro-computadora	8
Interocepción	11
Lactato	3
Memoria de trabajo	2
Memoria declarativa	4
Memoria procedimental	4
Médula espinal	1
Motoneurona	1
Neurociencia cognitiva	11
Neuro derechos	10
Neuroeducación	11
Neurofeedback	9
Neurogénesis adulta	4
Neuroimagen funcional	9
Neuromodulación	9

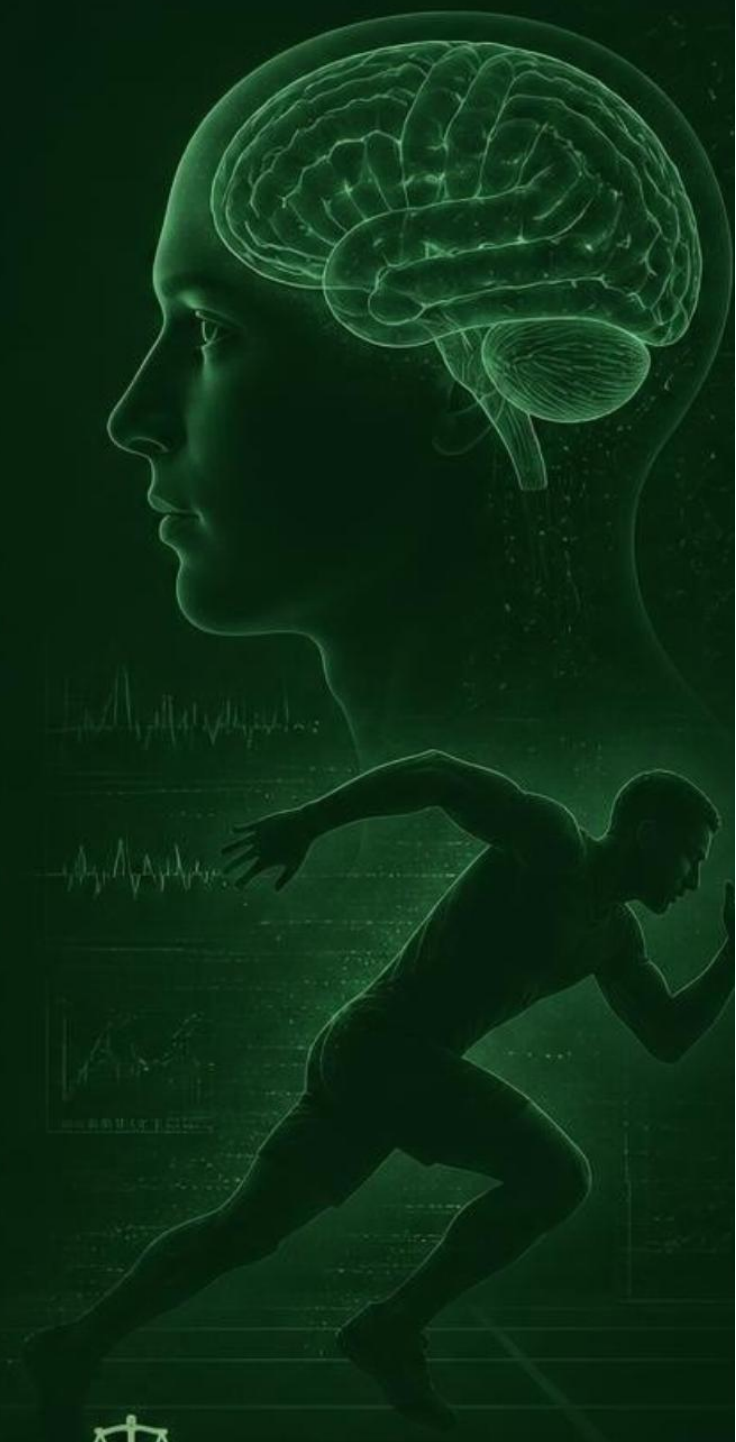
Término	Categoría
Neurona	1
Neuropatía periférica	8
Neurorrehabilitación	8
Neuroética	10
Percepción	5
Percepción del esfuerzo (RPE)	7
Plasticidad sináptica	4
Planificación	2
Poda sináptica	4
Potenciación a largo plazo	4
Privacidad de datos neurofisiológicos	10
Propiocepción	1
Recuperación	7
Reeducación neuromotora	8
Regulación emocional	6
Retorno al juego	8

Término	Categoría
rTMS	9
Serotonina	6
Sinapsis	1
Sistema límbico	11
Sistema nervioso autónomo	1
Sistema nervioso central	1
Sistema nervioso periférico	1
Sistema oxidativo	3
Sobreentrenamiento	7
tACS	9
tDCS	9
Teoría de la U invertida	6
tFUS	9
Toma de decisiones	2
Traumatismo craneoencefálico	8
Umbral anaeróbico	3

Término	Categoría
Variabilidad de la frecuencia cardíaca	7
Vía corticoespinal	1
Visión periférica	5
WADA	10

Nota final: Este glosario constituye una herramienta de consulta complementaria a los capítulos del libro. Se recomienda al lector utilizarlo como apoyo para la comprensión de los términos técnicos y para reforzar el aprendizaje de los conceptos fundamentales de la neurociencia aplicada al deporte.

Neurociencia y deporte: fundamentos, aplicaciones y desafíos éticos.



Este libro ofrece una visión integral e interdisciplinaria sobre la relación entre el cerebro y el rendimiento deportivo. A partir de los avances más recientes en neurociencia, se exploran los mecanismos neurales que sustentan la percepción, la toma de decisiones, el aprendizaje motor, la motivación y la resiliencia en el deporte.

Con un enfoque que conecta la teoría con la práctica, la obra presenta aplicaciones actuales en el entrenamiento, la prevención y la recuperación de lesiones, el rendimiento cognitivo y el bienestar mental de los atletas. Asimismo, aborda los dilemas éticos emergentes en el uso de tecnologías neurocientíficas y la protección de la integridad, la privacidad y la equidad en el deporte.

Dirigido a investigadores, profesionales del deporte, estudiantes y todos aquellos interesados en comprender cómo el conocimiento del cerebro puede transformar el presente y el futuro del deporte de manera responsable y humana.

Fundamentos neurocientíficos del rendimiento deportivo

Aplicaciones prácticas en entrenamiento, salud y recuperación

Tecnologías emergentes e innovación neurocientífica

Desafíos éticos y sociales en la neurociencia del deporte

ISBN: 978-9942-606-80-8

9 789942 606808

EDITORIAL UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO