

Neuroplasticidad generativa para la formación profesional

Rodríguez-Bustos Norma Elizabeth^{1,2*}, Morfín-Magaña Rodrigo², Vargas-Hernández José Guadalupe².

¹Universidad La Salle Bajío

²Tecnológico Nacional de México/ITS de Irapuato

*e-mail: norma.rb@irapuato.tecnm.mx

Resumen – La neuroplasticidad, entendida como la facultad del sistema nervioso para reorganizarse ante el entorno, ha cambiado la forma en que se concibe la forma de aprender y la capacidad de las personas para hacerlo en los últimos años, el concepto de neuroplasticidad generativa plantea un cambio de paradigma conceptual, donde más de una adaptación cerebral pasiva y limitada, esta postula que el individuo puede intervenir, de forma consciente y sistemática, en la dirección de sus propios cambios cognitivos, emocionales y conductuales. Este artículo analiza las bases neurocientíficas de que permiten este cambio de paradigma, rastreando su evolución desde el nacimiento del concepto de neuroplasticidad generativa hasta los hallazgos más relevantes en los últimos años. Asimismo, se examina su impacto en el aprendizaje, el desarrollo profesional y la rehabilitación. Metodológicamente, se realizó una revisión de literatura (2000-2024) en Scopus, Web of Science, PubMed y PsycINFO, enriquecida con la información de organizaciones como la OMS, la OCDE y la UNESCO. Finalmente, el trabajo resume la evidencia disponible y analiza perspectivas para estructurar programas formativos fundamentados en la ciencia del cerebro.

Índice de Términos – Neuroplasticidad generativa, Plasticidad sináptica, Neurociencias del aprendizaje, Desarrollo cerebral, Formación profesional.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio del cerebro partía de una premisa restrictiva inamovible: la arquitectura cerebral de las personas permanece fija en etapas posteriores la adultez. Los principios básicos iniciales en las neurociencias postulaban que el sistema nervioso central (SNC) del adulto carecía de la flexibilidad necesaria para generar nuevas conexiones de aprendizaje. Se tenía como base que el cerebro humano funcionaba de manera análoga a como lo hace un mecanismo cableado con conexiones físicas de forma fija y definitiva, una vez concluida la etapa de crecimiento. Este principio fue respaldado de forma indirecta por los primeros trabajos de Santiago Ramón y Cajal, quienes son pioneros de la neuroanatomía moderna, en cuyas conclusiones de su trabajo relata la incapacidad de regeneración de las vías del SCN en edad adulta, consolidando una visión inicial pesimista de la reconfiguración del órgano del pensamiento. Las consecuencias de este trabajo fueron severas, al servir de referencia en los campos de la medicina, la psicología clínica y la educación. El dogma de la estructura fija impuso un techo al desarrollo humano, bajo esta idea, los procesos de aprendizaje en el adulto se consideraban limitados

y las secuelas de las lesiones neurológicas se daban por definitivas, ignorando que el cerebro guarda una capacidad latente de reorganización a lo largo de toda su vida [1].

La revolución conceptual que comenzó a gestarse en la segunda mitad del siglo XX, a partir de los estudios pioneros de Donald Hebb (1949) sobre el aprendizaje sináptico, de las investigaciones de Michael Merzenich sobre la reorganización cortical en primates y de los trabajos de Eric Kandel sobre los mecanismos moleculares de la memoria que le valdrían el Premio Nobel de Fisiología o Medicina en el año 2000, estableció de manera irrefutable que el cerebro es un órgano de extraordinaria plasticidad, capaz de modificar su estructura y función en respuesta a la experiencia a lo largo de toda la vida [2,3].

El concepto de neuroplasticidad generativa va un paso más allá de la simple constatación de que el cerebro cambia: propone que el individuo puede convertirse en agente activo y deliberado de su propia transformación neurológica, utilizando estrategias específicas, prácticas cognitivas, meditación, ejercicio físico, aprendizaje estructurado, exposición controlada al estrés, para inducir cambios plásticos dirigidos hacia objetivos de desarrollo previamente definidos [4,5]. Este posicionamiento tiene consecuencias profundas no solo para la neurología clínica y la rehabilitación, sino para la educación, la formación profesional y el desarrollo del potencial humano en contextos organizacionales.

El presente artículo se estructura en torno a tres preguntas de investigación: ¿Cuáles son los mecanismos neurocientíficos que sustentan la neuroplasticidad generativa y cómo han evolucionado su comprensión en las últimas décadas? ¿Qué inductores experienciales, cognitivos, farmacológicos y tecnológicos han demostrado mayor eficacia para activar la plasticidad generativa en adultos? ¿Qué implicaciones tiene la evidencia disponible para el diseño de intervenciones educativas y de formación profesional basadas en la ciencia del cerebro?

II. EVOLUCIÓN CONCEPTUAL

El punto de inflexión en la comprensión de la plasticidad cerebral puede situarse en 1949, cuando Donald Hebb publicó su obra *The Organization of Behavior*, en la que formuló el principio que lleva su nombre y que puede enunciarse popularmente como: las neuronas que se activan juntas, se

conectan juntas (neurons that fire together, wire together). La regla hebbiana de aprendizaje sináptico establece que la eficacia de la transmisión sináptica entre dos neuronas se incrementa cuando ambas se activan de manera simultánea o secuencial de manera repetida, sentando así las bases de un mecanismo de cambio estructural dependiente de la actividad cerebral [6]. Este principio se retoma en los estudios de Eric Kandel sobre *Aplysia californica*, donde se demostró que el aprendizaje produce cambios físicos medibles en la morfología de las sinapsis, incluyendo el aumento en el número de terminales sinápticos y la modificación en la densidad de los receptores postsinápticos, y que estos cambios son duraderos y específicos para los estímulos que los indujeron [2]. Este hallazgo fue la base molecular de lo que hoy es la potenciación a largo plazo (LTP, por sus siglas en inglés), el cual es el mecanismo celular más estudiado de la plasticidad sináptica y del aprendizaje [7].

Una nueva perspectiva llegó de la mano de los experimentos pioneros de Michael Merzenich y su equipo entre los años ochenta y noventa. Sus investigaciones revelaron que los mapas corticales, tanto sensoriales como motores, distan de ser configuraciones rígidas, por el contrario, operan como configuraciones dinámicas en constante reacomodo, moldeadas por la frecuencia y el tipo de estímulos que reciben. A través de estudios realizados con primates en los años ochenta, Merzenich documentó un fenómeno peculiar tras la amputación de un dedo, la región de la corteza que antes respondía a ese miembro no quedaba inactiva, sino que era rápidamente colonizada por las señales de los dedos adyacentes. También se registró que cuando los sujetos eran sometidos a un entrenamiento intensivo de discriminación táctil, las áreas corticales vinculadas a los dedos estimulados se expandían notablemente, desplazando a las zonas no entrenadas [8]. Posteriormente, con la consolidación de la neuroimagen funcional, particularmente a través de la resonancia magnética funcional (fMRI), la tomografía por emisión de positrones (PET) y la magnetoencefalografía (MEG), se pudo constatar en pacientes vivos que el cerebro humano redistribuye de manera continua sus recursos corticales según las demandas del entorno, consolidando una regla biológica esencial que indica que cualquier destreza que se ejercite mediante una práctica deliberada, ya sea en el plano estrictamente motor, en los procesos cognitivos superiores o en la regulación emocional, alterará físicamente la microarquitectura de la corteza cerebral, dejando una huella estructural y funcional perfectamente verificable [9]. En ese mismo año, se presenta el estudio de Maguire et al. (2000) sobre taxistas de Londres, el cual encontró un agrandamiento significativo del hipocampo posterior en conductores con más años de experiencia en comparación con conductores con poca experiencia, usados como grupo de control, correlacionado con la extensión del conocimiento topográfico de la ciudad, este fue en uno de los estudios más citados en la literatura de neuroplasticidad ya que demostraba de manera elegante que incluso la estructuras cerebrales macroscópicas son moldeables por la experiencia acumulada en adultos.

El concepto de neuroplasticidad generativa, se presenta en varias líneas de investigación que aparecen en la primer década

del siglo XXI. La obra *The Brain That Changes Itself* de Norman Doidge (2007) describe para el público general la evidencia sobre casos extraordinarios de reorganización cerebral deliberada, desde la recuperación funcional tras accidentes cerebrovasculares severos hasta el desarrollo de nuevas capacidades sensoriales en individuos con deficiencias congénitas. Posteriormente, Richard Davidson y Sharon Begley (2012), en *The Emotional Life of Your Brain*, presentaron los resultados de décadas de investigación con meditadores tibetanos expertos que mostraban patrones de activación cerebral, valorados de forma cualitativa, y que se mostraron distintos al grupo de control de no meditadores, mostrando mayor actividad en regiones prefrontales izquierdas asociadas con el bienestar y la regulación emocional, y menor actividad ante estímulos estresantes. Estos hallazgos sugirieron por primera vez que la práctica mental sostenida, independientemente de cualquier estímulo externo, puede producir cambios plásticos sustanciales en la arquitectura funcional del cerebro adulto. Este concepto de neuroplasticidad generativa se distingue de la neuroplasticidad reactiva, que se entiende como el cambio cerebral producido por lesiones, enfermedades o alteraciones ambientales no planificadas, por el carácter intencional, dirigido y estratégico del proceso que lo genera. El individuo no es un receptor pasivo de estímulos que producen cambios cerebrales no controlados, sino un agente que selecciona deliberadamente las experiencias, las prácticas y los entornos que maximizarán los cambios plásticos en las direcciones deseadas [3,10]. La comprensión de los mecanismos moleculares subyacentes a la neuroplasticidad generativa ha avanzado de manera extraordinaria en las últimas décadas. Como se muestra en la Fig. 1, la neuroplasticidad en principio se puede entender desde tres niveles: el nivel celular, el nivel molecular y el nivel sináptico.

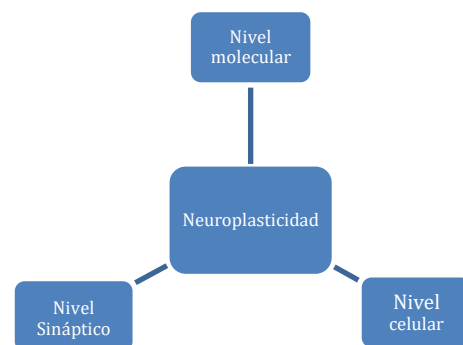


Fig. 1 Niveles base de la neuroplasticidad.

A nivel celular, los principales mecanismos identificados incluyen: la potenciación a largo plazo (LTP) y la depresión a largo plazo (LTD), mediadas por cambios en la densidad y composición de los receptores NMDA y AMPA en la membrana postsináptica; la neurogénesis adulta, generación de nuevas neuronas a partir de células madre neurales, demostrada de manera robusta en el hipocampo y el bulbo olfatorio de mamíferos adultos [11], la sinaptogénesis inducida por actividad, que implica la formación de nuevas conexiones sinápticas entre neuronas previamente no conectadas; y la

mielinización de axones, que aumenta la velocidad y la eficiencia de la transmisión neural en circuitos repetidamente activados [12]. A nivel molecular, el factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF, Brain-Derived Neurotrophic Factor) ha emergido como el mediador molecular más crítico de los procesos de neuroplasticidad generativa. El BDNF promueve la supervivencia neuronal, estimula el crecimiento de dendritas y axones, facilita la formación de nuevas sinapsis y es indispensable para la consolidación de la memoria a largo plazo. De manera significativa para las aplicaciones en educación y formación, el ejercicio físico aeróbico ha demostrado ser el inductor no farmacológico más potente de la expresión de BDNF en el hipocampo, lo que explica parcialmente la asociación entre actividad física y mejora cognitiva documentada en numerosos [13,14]. Como se muestra en la Fig. 2, la neuroplasticidad es el medio que permite una evolución y reconfiguración del cerebro, la cual se puede dividir en cinco etapas: experiencia, activación, adaptación, consolidación y transformación.



Fig. 2 Evolución del cerebro a través de la neuroplasticidad.
(Imagen generada con IA)

III. PERSPECTIVAS INTERNACIONALES

En los Estados Unidos y Canadá, la intersección entre neurociencias y educación, *mind, brain and education science*, ha generado un campo de investigación aplicada de creciente influencia. El programa Mind, Brain, and Education de la Universidad de Harvard, dirigido por Kurt Fischer, ha producido una línea de investigación que busca identificar principios neurocientíficos con implicaciones directas para el diseño curricular y pedagógico, incluyendo el rol de la atención, la emoción y el sueño en los procesos de consolidación del aprendizaje y neuroplasticidad [15]. Un año más tarde en el trabajo del neurocientífico Michael Merzenich con la empresa Posit Science, que desarrolló el programa BrainHQ, basado en la estimulación cognitiva adaptativa y validado en más de 100 estudios clínicos publicados en revistas de alto impacto, demostró que el entrenamiento cognitivo computarizado intensivo produce mejoras transferibles en velocidad de procesamiento, memoria de trabajo y atención sostenida en adultos mayores, asociadas con cambios verificables en la actividad cerebral medidos mediante EEG [16]. Este programa ha sido adoptado por sistemas de salud y organizaciones de

formación profesional en más de 30 países.

En Europa, la investigación sobre neuroplasticidad generativa ha tenido un desarrollo particularmente robusto en el contexto del envejecimiento activo y la prevención del deterioro cognitivo. El proyecto ACTIVE (Advanced Cognitive Training for Independent and Vital Elderly), financiado por los National Institutes of Health y con colaboración internacional europea, demostró en un ensayo aleatorio controlado con más de 2,800 participantes que el entrenamiento cognitivo en velocidad de procesamiento, memoria y razonamiento producía mejoras que persistían hasta diez años después de la intervención [17]. La evidencia contemporánea sobre la maleabilidad del cerebro adulto proviene, en gran medida, de esfuerzos interinstitucionales de vanguardia. Instituciones como el Brain and Mind Institute de la Universidad de Western Ontario, en colaboración con el Instituto Max Planck, Alemania, desarrollaron protocolos orientados a mapear esta evolución de forma cuantitativa, mediante el uso de resonancia magnética. Las investigaciones realizadas lograron constatar modificaciones anatómicas en sujetos de mediana edad sometidos a programas de entrenamiento cognitivo intensivo con duración de entre 8 y 12 semanas. Los datos revelaron un incremento que fue medible en la materia gris localizada en las cortezas prefrontal y parietal, los cuales son áreas críticas para las funciones ejecutivas y la integración sensorial del cerebro. Lo anterior adquiere relevancia ya que logra demostrar de forma empírica que los periodos de plasticidad generativa permanecen activos y funcionales en etapas avanzadas de la vida, derribando definitivamente los límites temporales que imponía la neurociencia del siglo pasado, que indicaban que la plasticidad cerebral se perdía en edad adulta [18].

En Asia, la neuroplasticidad generativa se cruza con prácticas orientales de entrenamiento mental, donde las metodologías contemplativas de la meditación budista tibetana han consolidado un modelo para analizar cómo la introspección deliberada altera la biología cerebral. El trabajo del neurocientífico Richard Davidson en la Universidad de Wisconsin-Madison, estudió meditadores expertos, entre ellos al monje Matthieu Ricard, Davidson y detectó firmas neurofisiológicas cualitativamente distintas a las de la población general [19]. Los sujetos en el estudio no solo mostraban una activación basal significativamente mayor, sino una sincronía en la producción de ondas gamma de alta amplitud, lo que sugiere que estados mentales como la compasión y la atención plena pueden obtenerse a través del esfuerzo sostenido y la introspección de la meditación. En la Universidad de Osaka, de forma similar, han documentado que prácticas contemplativas de tan solo 8 semanas de duración en ambientes de trabajo, como lo reportado en el programa *Mindfulness-Based Stress Reduction (MBSR)* de Jon Kabat-Zinn, producen aumentos verificables en la densidad de materia gris en el hipocampo, y otras regiones involucradas en el aprendizaje, como la memoria, la regulación emocional y la perspectiva social [20].

En América Latina, Los estudios sobre neuroplasticidad generativa ha encontrado aplicación significativa en el contexto

de la educación en situaciones de vulnerabilidad socioeconómica. El trabajo del neurocientífico argentino Facundo Manes y del Instituto de Neurología Cognitiva (INECO) en Buenos Aires ha generado una línea de investigación y divulgación sobre el potencial transformador de la neuroplasticidad que ha tenido amplia influencia en políticas educativas en Argentina, Chile y México [21]. Estudios realizados en Brasil por el grupo de investigación de Sidarta Ribeiro en el *Instituto do Cérebro de la Universidad Federal de Rio Grande do Norte* han profundizado en el papel del sueño como inductor crítico de neuroplasticidad, documentando que la privación de sueño, prevalente en poblaciones estudiantiles y laborales latinoamericanas, compromete significativamente los procesos de consolidación sináptica y neuroplasticidad que ocurren durante las fases REM y de sueño de ondas lentas, con consecuencias directas sobre la retención del aprendizaje y la flexibilidad cognitiva [22].

IV. CONTEXTO EDUCATIVO

La Tabla 1 sintetiza los principales inductores de neuroplasticidad generativa identificados en la literatura, con su nivel de evidencia y aplicabilidad en contextos educativos y de formación profesional.

Tabla 1. Inductores de Neuroplasticidad

Inductor de neuroplasticidad	Mecanismo principal	Nivel de evidencia	Efecto en adultos	Región cerebral	Aplicación formativa
Ejercicio físico aeróbico	Incremento de BDNF	Alto (meta-análisis)	Muy significativo	Hipocampo, CPF	Pausas activas en formación
Práctica deliberada de habilidades	LTP, mielinización	Muy alto (RCTs)	Significativo	Corteza motora, CPF	Entrenamiento intensivo, simulación
Meditación y mindfulness	Regulación atencional	Alto (longitudinal)	Significativo en 8 sem.	Ínsula, CCA, CPF	Programas MBSR laborales
Aprendizaje de nueva lengua	Sinaptogénesis, LTP	Muy alto (neuroimagen)	Alto, sostenido	Área de Broca, hipocampo	Formación bilingüe, movilidad int.
Sueño reparador (>7 horas)	Consolidación sináptica	Muy alto (experimental)	Crítico, no sustituible	Hipocampo, neocorteza	Diseño de horarios formativos
Novedad y exploración ambiental	Neurogénesis adulta	Moderado-alto	Moderado en adultos	Hipocampo, corteza	Ambientes de aprendizaje ricos
Entrenamiento cognitivo adaptativo	Fortalecimiento redes atencionales	Alto (BrainHQ, >100 ECA)	Significativo en mayores	CPF, lóbulo parietal	Plataformas digitales de entrenamiento
Interacción social enriquecida	Activación circuitos sociales	Moderado	Positivo en todas las edades	CPF ventromedial, ínsula	Aprendizaje colaborativo

Nota: CPF = Corteza Prefrontal; CCA = Corteza Cingulada Anterior; LTP = Potenciación a Largo Plazo; RCT = Ensayo Aleatorizado Controlado; ECA = Ensayo Clínico Aleatorizado; BDNF = Factor Neurotrófico Derivado del Cerebro; sem. = semanas. Elaboración con base en Cotman et al. (2007), Hölzel et al. (2011), Merzenich (2013), Ribeiro (2019) y Zatorre et al. (2012).

La evidencia sobre neuroplasticidad generativa en contextos de formación profesional puede abordarse bajo el siguiente conjunto de principios. El primero y más fundamental es el principio de especificidad: la plasticidad cerebral inducida por la práctica es altamente específica para los circuitos activados durante esa práctica, lo que implica que el aprendizaje de habilidades profesionales requiere práctica deliberada en contextos que reproduzcan fielmente las demandas cognitivas, emocionales y perceptuales del entorno laboral real [23]. Las

transformaciones estructurales profundas en el tejido nervioso del cerebro durante el aprendizaje se rigen por la pauta de intensidad y distribución temporal. La evidencia ha demostrado que las modificaciones anatómicas más estables no se logran mediante esfuerzos aislados, sino a través de estímulos de alta frecuencia que son sostenidos de forma regular en el tiempo, y que a su vez estos son alternados con fases de recuperación sistémica por medio del sueño que juega un rol metabólico importante para la fijación del aprendizaje en la memoria. Lo anterior difiere de lo que se emplea en el diseño de las metodologías tradicionales de capacitación, en las cuales se insiste en concentrar densas cargas de información en jornadas extenuantes. Los modelos de espaciado cognitivo han confirmado que las microdosis de aprendizaje, sesiones breves y recurrentes y distribuidas con intervalos estratégicos pueden mejorar de forma considerable la tasa de neuroplasticidad y garantizan un aprendizaje significativo a largo plazo [24]. El sistema nervioso central opera bajo una estricta demanda de novedad y escalabilidad en los desafíos que cada individuo debe afrontar, el cerebro es por naturaleza un órgano economizador de energía, por lo que ante estímulos monótonos o tareas que ya domina, se activan procesos de habituación que disminuyen drásticamente la activación cortical, reduciendo el gasto energético y mitigando la respuesta plástica. Para que esto no suceda y activar de forma sostenida la maquinaria de la neuroplasticidad, se deben diseñar entornos con una complejidad progresiva y motivantes para el individuo, de tal forma que las demandas cognitivas permanezcan justo en el límite superior de las competencias actuales del individuo, estimulando un estado de alerta biológica constante por los sistemas de atención y motivación, los cuales actúan como los verdaderos catalizadores químicos necesarios para reconfigurar las redes neuronales [8].

La neuroplasticidad generativa en el desarrollo corporativo y profesional ha encontrado que los procesos de reconfiguración cerebral no se restringen al plano puramente cognitivo, sino que abarcan de forma también y de forma idéntica a las redes de regulación afectiva. Esta nueva dimensión emocional incide de manera directa en el rendimiento laboral, la salud psicofísica y los procesos de aprendizaje continuo del individuo. La investigación de Davidson et al. (2003) aporta evidencia que es crucial para demostrar que individuos que exhiben una mayor activación basal en la corteza prefrontal izquierda, zona que es un marcador neurofisiológico vinculado con los estados afectivos positivos y de la resiliencia, desarrollan respuestas inmunológicas significativamente más fuertes, reportan niveles elevados de bienestar subjetivo y demuestran una tolerancia superior a la frustración en entornos adversos. Estos descubrimientos son relevantes y se deben tener en cuenta al momento de diseñar programas de capacitación para sectores de alto desgaste físico, psíquico y emocional. Entrenar habilidades técnicas en los procesos de capacitación y aprendizaje ya no es suficiente, se debe dotar al individuo de una reconfiguración en las conexiones sinápticas que le permitan la correcta toma de decisiones bajo entornos presión. El modelado de la plasticidad emocional permite obtener los

perfiles de los individuos que operan en la frontera del estrés crónico, los cuales van desde el personal médico, pasando por los educadores inmersos en contextos de vulnerabilidad social, hasta los ingenieros de calidad responsables de resolver fallas bajo plazos estrictos y situaciones de alta presión [25]. La gestión emocional debe ser percibida como una competencia maleable y que es posible entrenar, las organizaciones pueden migrar de enfoques puramente de capacitación técnica a estrategias que involucren el fortalecimiento cognitivo-emocional.

El desarrollo de tecnologías de interfaz cerebro-computadora (BCI), como el neurofeedback en tiempo real y estimulación cerebral no invasiva, que incluyen la estimulación transcraneal de corriente directa y la estimulación magnética transcraneal (TMS), hacen posible que la neuroplasticidad sea considerada de manera formal en contextos de aprendizaje. Ya que el neurofeedback, ha demostrado su capacidad para entrenar a los individuos a modular voluntariamente sus propios patrones de actividad cerebral, con efectos positivos sobre la atención sostenida, la memoria de trabajo y la gestión del estrés en músicos, atletas de élite y, más recientemente, en contextos de formación corporativa [26]. Si bien esta tecnología se encuentra aún en fase de desarrollo, su potencial para personalizar y acelerar los procesos de neuroplasticidad generativa la hacen muy prometedora para la neuroeducación del próximo siglo.

III. DESARROLLO

La presente investigación se basa en una revisión sistemática de literatura con síntesis narrativa. La estrategia de búsqueda bibliográfica se ejecutó en las bases de datos Scopus, Web of Science, PubMed, PsycINFO y Google Scholar, utilizando ecuaciones booleanas que combinaron términos en inglés y español, generative neuroplasticity, synaptic plasticity AND learning, adult neurogenesis, experience-dependent plasticity, BDNF AND learning, mindfulness AND neuroplasticity, exercise AND brain plasticity, cognitive training AND neuroplasticity, directed neuroplasticity, neuroeducation, brain-based learning. El período de búsqueda de las publicaciones fue entre 2000 y 2024, con inclusión de obras iniciales de alto impacto citacional [2,6]. Los criterios de búsqueda fueron artículos originales de investigación publicados en revistas con factor de impacto en el cuartil Q1 o Q2 de su categoría en Scopus o JCR, revisiones sistemáticas y análisis con metodología PRISMA documentada; y obras monográficas de autores de reconocida autoridad en el campo. El proceso de selección se realizó en cuatro etapas: identificación inicial mediante búsqueda automatizada (n = 1,247 registros), eliminación de duplicados (n = 983 registros únicos), preselección por título y resumen (n = 134 documentos), y lectura completa con aplicación de criterios de calidad metodológica (n = 78 documentos incluidos en la síntesis final). Los hallazgos fueron organizados mediante matrices de análisis temático con cinco dimensiones, mecanismos moleculares y celulares, plasticidad cortical, inductores experienciales, aplicaciones clínicas y educativas, y perspectivas internacionales.

V. RESULTADOS

El análisis sistemático de la literatura revisada permite identificar seis hallazgos de importancia para reportar:

- La evidencia sobre neuroplasticidad generativa en adultos es robusta, y ha demostrado a través de múltiples metodologías, histología post-mortem, neuroimagen estructural y funcional, electrofisiología, estudios conductuales y moleculares, cambiando definitivamente el paradigma del cerebro adulto inmutable. Actualmente, no se trata de si la neuroplasticidad generativa es posible en adultos, sino sobre la magnitud, la especificidad, las ventanas temporales óptimas y los límites de este proceso.
- El ejercicio físico aeróbico y la práctica constante de habilidades complejas son los inductores no farmacológicos de mayor eficacia y aplicabilidad inmediata en contextos formativos. Su mecanismo de acción está bien documentado y sus efectos sobre el aprendizaje son significativos.
- La práctica contemplativa (como la meditación) es otro inductor importante de neuroplasticidad, donde se han documentado estudios que muestran cambios estructurales verificables en regiones cerebrales asociadas con la atención y la regulación emocional, en intervalos de 8 a 12 semanas de práctica regular. Su integración en programas de formación profesional es factible, de bajo costo y de creciente aceptación en organizaciones de alto desempeño.
- El sueño también se presenta como un inductor de neuroplasticidad, cuya privación compromete de manera aguda y crónica los mecanismos de consolidación sináptica y retención del aprendizaje. Lo cual tiene implicaciones críticas para el diseño de programas de formación intensiva, que frecuentemente ignoran la importancia del descanso, con consecuencias sobre la eficacia del aprendizaje de los individuos.
- La evidencia neurocientífica disponible es considerable, pero su aplicación en el diseño de programas de educación superior y formación profesional es muy reducida. Ya que la mayoría de los sistemas educativos continúan basando el aprendizaje en principios alejados al desarrollo del cerebro como son: sesiones largas y concentradas, énfasis en el procesamiento consciente y denso, y descuido de los inductores de neuroplasticidad como ejercicio, sueño, novedad ambiental y conexión social.
- Las tecnologías emergentes de neurofeedback, estimulación cerebral no invasiva y entrenamiento cognitivo adaptativo basado en inteligencia artificial representan el horizonte de mayor potencial para la personalización y aceleración de los procesos de neuroplasticidad generativa en contextos formativos, aunque requieren aún de mayor evidencia sobre su eficacia

a largo plazo, su seguridad y sus implicaciones éticas antes de una adopción masiva.

Estos resultados son consistentes con lo presentado por Doidge (2015) en *The Brain's Way of Healing*, que documenta casos de recuperación y desarrollo extraordinarios basados en la activación de mecanismos de neuroplasticidad, y de forma similar con la investigación sobre *brain-based education* propuesta por Fischer y Immordino-Yang (2008), que presenta una integración sistemática de los hallazgos de las neurociencias en las prácticas pedagógicas de la educación formal.

La integración de los principios de neuroplasticidad generativa en el diseño de programas de educación superior demanda un reposicionamiento profundo de los supuestos pedagógicos dominantes. El término propuesto por Tokuhami-Espinosa (2011) para denominar el conjunto de prácticas pedagógicas fundamentadas en la evidencia neurocientífica fue pedagogía neuroplástica y se caracterizaría por: la distribución espaciada temporal óptima de la práctica, el avance progresivo de la complejidad para mantener al estudiante en la zona de máxima plasticidad, la incorporación de inductores de neuroplasticidad, especialmente el ejercicio físico y las prácticas de meditación como componentes curriculares formales, y el diseño de entornos de aprendizaje que estimulen la novedad, la exploración y la conexión social. En relación a la formación de ingenieros y profesionales técnicos, estos principios pueden traducir como: incorporar pausas de actividad física aeróbica de 20-30 minutos antes de sesiones de aprendizaje de alta demanda cognitiva, diseñar las secuencias de práctica con intervalos de tiempo y asimilación adecuados, introducir prácticas breves de meditación al inicio de las sesiones para optimizar la atención sostenida, y organizar los programas de formación para que se maximice la neuroplasticidad y la retención a largo plazo [14,24].

El impacto de la neuroplasticidad generativa en la formación profesional radica en la validación neurocientífica que confiere al desarrollo de las competencias socioemocionales en los procesos de aprendizaje, también conocidas como habilidades blandas. La ciencia del cerebro ha demostrado que la atención focalizada bajo condiciones estresantes, la empatía en escenarios de conflicto y la persistencia motivacional a largo plazo no son solo predisposiciones innatas, sino que responden a un entrenamiento persistente, que opera bajo los mismos principios que rigen la adquisición de destrezas motoras complejas [25,27]. Esta perspectiva permite que se modifique el diseño curricular en la educación superior y el entorno corporativo en vías de mejorar y fortalecer el aprendizaje, asumiendo que el tejido neural que sostiene el liderazgo efectivo y la resiliencia operativa es maleable y que se debe trabajar por medio del desarrollo de competencias socioemocionales, las cuales se deben convertir en un

imperativo para el diseño de formación pedagógica con un sustento biológico riguroso. Este diseño ya no debe considerar únicamente dinámicas grupales superficiales, sino implementar protocolos formativos sólidos basados en la evidencia neurobiológica, ya que la efectividad que ha demostrado, trasciende la mera percepción subjetiva de los participantes, pudiendo ser medible mediante el cruce de indicadores conductuales en el puesto de trabajo y métricas neurobiológicas verificables, tales como la variabilidad de la frecuencia cardíaca o la estabilización de los biomarcadores de estrés oxidativo.

VI. CONCLUSIONES

La neuroplasticidad generativa ha permitido un cambio de paradigma en la comprensión del desarrollo humano, al demostrar que el individuo no es un espectador de su evolución biológica, sino que participa como constructor de la microarquitectura de su cerebro. Esta capacidad de remodelación estructural y funcional del sistema nervioso a través de la selección consciente de estímulos, prácticas y entornos tiene un respaldo acumulado durante décadas de investigación neurocientífica. Dentro de los entornos de formación y alta competencia, la evidencia señala un grupo de inductores críticos cuya efectividad ha sido validada mediante neuroimagen, el ejercicio físico aeróbico, el entrenamiento en destrezas de alta complejidad, la meditación mediante prácticas contemplativas y la arquitectura del sueño reparador como fase de fijación sináptica para el aprendizaje. Estos inductores biológicos deben ser considerados en los modelos de educación y capacitación técnica y se perfilan como una competencia estratégica indispensable en entornos de alta competencia laboral. El mercado laboral exige profesionales adaptativos, estables y con un alto desempeño bajo presiones continuas y cambiantes, por lo que los conocimientos aquí expuestos trascienden la descripción de un fenómeno neurobiológico, al notar que el cerebro adulto conserva una maleabilidad latente que permanece más allá de las limitaciones de la edad cronológica de los individuos. Activar este potencial latente puede estimular una transformación y crecimiento continuo en el individuo que conscientemente busque la reconfiguración del cerebro.

REFERENCIAS

- [1] Berlucchi, G., & Buxton, H. A. (2009). Neuronal plasticity: Historical roots and evolution of meaning. *Experimental Brain Research*, 192(3), 307-319. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1611-6>.
- [2] Kandel, E. R. (2001). The molecular biology of memory storage: A dialogue between genes and synapses. *Science*, 294(5544), 1030-1038. <https://doi.org/10.1126/science.1067020>.
- [3] Merzenich, M. M. (2013). *Soft-wired: How the new science of brain plasticity can change your life*. Parnassus Publishing.
- [4] Doidge, N. (2007). *The brain that changes itself: Stories of personal triumph from the frontiers of brain science*. Viking.

- [5] Davidson, R. J., & Begley, S. (2012). *The emotional life of your brain: How its unique patterns affect the way you think, feel, and live — and how you can change them*. Hudson Street Press.
- [6] Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior: A neuropsychological theory*. Wiley.
- [7] Bliss, T. V. P., & Collingridge, G. L. (1993). A synaptic model of memory: Long-term potentiation in the hippocampus. *Nature*, 361, 31-39. <https://doi.org/10.1038/361031a0>.
- [8] Merzenich, M. M., Nelson, R. J., Stryker, M. P., Cynader, M. S., Schoppmann, A., & Zook, J. M. (1984). Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys. *Journal of Comparative Neurology*, 224(4), 591-605.
- [9] Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Neuroplasticity: Changes in grey matter induced by training. *Nature*, 427, 311-312. <https://doi.org/10.1038/427311a>.
- [10] Doidge, N. (2015). *The brain's way of healing: Remarkable discoveries and recoveries from the frontiers of neuroplasticity*. Viking.
- [11] Ericsson, A., & Pool, R. (2016). *Peak: Secrets from the new science of expertise*. Eamon Dolan/Houghton Mifflin Harcourt.
- [12] Fields, R. D. (2008). White matter in learning, cognition and psychiatric disorders. *Trends in Neurosciences*, 31(7), 361-370. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2008.04.001>.
- [13] Cotman, C. W., Berchtold, N. C., & Christie, L. A. (2007). Exercise builds brain health: Key roles of growth factor cascades and inflammation. *Trends in Neurosciences*, 30(9), 464-472. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2007.06.011>.
- [14] Hillman, C. H., Erickson, K. I., & Kramer, A. F. (2008). Be smart, exercise your heart: Exercise effects on brain and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(1), 58-65. <https://doi.org/10.1038/nrn2298>.
- [15] Fischer, K. W., & Immordino-Yang, M. H. (Eds.). (2008). *The Jossey-Bass reader on the brain and learning*. Jossey-Bass.
- [16] Smith, G. E., Housen, P., Yaffe, K., Ruff, R., Kennison, R. F., Mahncke, H. W., & Zelinski, E. M. (2009). A cognitive training program based on principles of brain plasticity: Results from the Improvement in Memory with Plasticity-based Adaptive Cognitive Training (IMPACT) study. *Journal of the American Geriatrics Society*, 57(4), 594-603.
- [17] Rebok, G. W., Ball, K., Guey, L. T., Jones, R. N., Kim, H. Y., King, J. W., & Willis, S. L. (2014). Ten-year effects of the advanced cognitive training for independent and vital elderly cognitive training trial on cognition and everyday functioning in older adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, 62(1), 16-24. <https://doi.org/10.1111/jgs.12607>.
- [18] Zatorre, R. J., Fields, R. D., & Johansen-Berg, H. (2012). Plasticity in gray and white: Neuroimaging changes in brain structure during learning. *Nature Neuroscience*, 15(4), 528-536. <https://doi.org/10.1038/nn.3045>.
- [19] Lutz, A., Greischar, L. L., Rawlings, N. B., Ricard, M., & Davidson, R. J. (2004). Long-term meditators self-induce high-amplitude gamma synchrony during mental practice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(46), 16369-16373. <https://doi.org/10.1073/pnas.0407401101>.
- [20] Hölzel, B. K., Carmody, J., Vangel, M., Congleton, C., Yerramsetti, S. M., Gard, T., & Lazar, S. W. (2011). Mindfulness practice leads to increases in regional brain gray matter density. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 191(1), 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2010.08.006>.
- [21] Manes, F., & Niro, M. (2014). *Usar el cerebro: Conocer nuestra mente para vivir mejor*. Paidós.
- [22] Ribeiro, S. (2019). *O oráculo da noite: A história e a ciência do sonho*. Companhia das Letras.
- [23] Eriksson, P. S., Perfilieva, E., Björk-Eriksson, T., Alborn, A. M., Nordborg, C., Peterson, D. A., & Gage, F. H. (1998). Neurogenesis in the adult human hippocampus. *Nature Medicine*, 4(11), 1313-1317. <https://doi.org/10.1038/3305>.
- [24] Cepeda, N. J., Pashler, H., Vul, E., Wixted, J. T., & Rohrer, D. (2006). Distributed practice in verbal recall tasks: A review and quantitative synthesis. *Psychological Bulletin*, 132(3), 354-380. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.3.354>.
- [25] 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>.
- [26] Zoefel, B., Huster, R. J., & Herrmann, C. S. (2011). Neurofeedback training of the upper alpha frequency band in EEG improves cognitive performance. *NeuroImage*, 54(2), 1427-1431. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.08.078>.
- [27] Davidson, R. J., Kabat-Zinn, J., Schumacher, J., Rosenkranz, M., Muller, D., Santorelli, S. F., & Sheridan, J. F. (2003). Alterations in brain and immune function produced by mindfulness meditation. *Psychosomatic Medicine*, 65(4), 564-570.