



Artículo de revisión

Evolución del circuito movimiento-acción y su importancia para el aprendizaje

Evolution of the movement-action loop and its importance to learning process

Alma Dzib-Goodin ^{1*} y Daniel Yelizarov ¹

¹ Learning & Neurodevelopment Research Center. USA.

Resumen

Hablar de aprendizaje lleva a pensar inmediatamente en los procesos educativos, o bien en la perspectiva psicológica. Sin duda alguna, es una necesidad la comprensión de sus mecanismos pues se atribuye a la educación, la formadora de aprendizajes para la vida en las sociedades humanas. Sin embargo, desde la perspectiva evolutiva, la historia es muy diferente, pues implica un proceso puesto al servicio de las especies, con fines de pervivencia, capaz de adaptarse a los entornos tanto físicos, como culturales, que se ha visto beneficiado de procesos genéticos, proteínicos y cerebrales, para crear redes sofisticadas de percepciones y acciones, capaces de transformar los ambientes, resolver necesidades, e innovar. Ante esto, el punto medular de este artículo es analizar el movimiento como respuesta a través de acciones y su evolución desde las proteínas hasta los cambios genéticos que diseñaron las redes neuronales actuales con fines de la manipulación y percepción del cuerpo en el espacio, que permitieron la capacidad de adaptación al ambiente, lo cual implica un cambio evolutivo que surge de manera transversal por todas las especies y que se observa de manera sofisticada en la especie humana.

Palabras clave: evolución, circuito percepción acción, aprendizaje, habilidad motora

Abstract

Speaking about learning immediately leads to think of the educational or psychological perspectives, which certainly is really important to understand its mechanisms to help learners to process all the information given in human societies, in order to create skills for life. However, from an evolutionary perspective, the story is very different, because it involves a process as service of the species, with the goal of adaptation to both physical and cultural, that began with genetic and protein processes until create sophisticated neural additions in order to modulate perception-action loops capable to transform environments, solve needs and innovate. From this perspective, the central point of this article is to analyze movement as a response through actions and its evolution from proteins to genetic changes, that designed the existing neural networks for handling a body perception in the space, which allowed adaptability to the environment, and implies an evolutionary change that emerge transversally in all species, but observed in a much more sophisticated way in humans.

Keywords: evolution, perception-action loop, learning, visuomotor skill

Introducción

Mark Baldwin en 1896 propuso que el aprendizaje individual puede explicar fenómenos evolutivos, sin la necesidad de emplear mecanismos Lamarckianos, sin embargo, en su época esta propuesta nunca fue totalmente aceptada, debido a la dificultad de comprobar que esto fuera posible en la naturaleza (Susuki & Arita, 2004). Aunque si se toma en cuenta el entorno y los cambios que en él suceden, puede tener más éxito la propuesta.

La idea generalizada de que se requiere un sistema nervioso complejo para que sea posible el aprendizaje y por ende la adaptación, carece de sentido cuando se analizan otras especies y desde hace más de 25 años diversos investigadores han propuesto que el ambiente es un catalizador de respuestas adaptativas (Nolfi & Parisi, 1994, 1996; Hinton, 1987).

Aún los virus y las bacterias son capaces de reaccionar ante el medio y crear cambios en las señales con fines de pervivencia (Dzib Goodin, 2013b), por lo que el mecanismo de aprendizaje debió sofisticarse para lograr un control más claro del entorno y, por ende, mejor adaptación, mucho antes del surgimiento de un sistema nervioso sofisticado.

Los psicólogos que estudian la curiosidad en los seres humanos y los animales definen al aprendizaje como el motivador principal del comportamiento, sin embargo, no logran definir una teoría sostenible que permita

entender por qué el aprendizaje surge en la historia evolutiva de las especies, lo cual es clave para comprender el cómo se aprende.

Es por eso que se vuelve necesario observarlo desde un contexto mucho más amplio, y proponemos una exploración desde diversas perspectivas que permitan reconocer el papel del movimiento y los circuitos sensoriales como impulsores clave del aprendizaje, pues la percepción del espacio y la capacidad del cuerpo para abstraer distancias y la manipulación motora son la clave evolutiva más sofisticada entre las especies.

Así, desde el punto de vista de la inteligencia artificial, Little y Sommers (2011, 2013), explican que las ventajas evolutivas del aprendizaje radica en la utilidad que éste genera para controlar y comprender el entorno, pues los agentes que aprenden de manera más eficiente, son aquellos capaces de explorar opciones dirigidas a objetivos específicos, por lo que los avances en las redes neuronales artificiales, han sido capaces de diseñar entes tecnológicos capaces de activar el aprendizaje con redes jerárquicas de acción sobre el ambiente, a partir de mapas que correlacionan el aprendizaje sensorio-motor de manera más eficiente (Saegusa, Metta, & Sandini, 2012).

¹ Correspondencia: alma@almadzib.com.

¿Cómo surge la relación entre movimiento y aprendizaje?

Autores como Jékely, Kreijzer, y Godfrey-Smith (2015) o Wray (2015) proponen que la evolución neuronal a nivel espacial requirió que el sistema nervioso desarrollara habilidades de control motor, respuestas fisiológicas y el desarrollo de las respuestas específicas, como la relación ojo-mano que requieren controles finos a nivel cerebral, y que esto fue posible debido al ambiente.

Pero dicha sofisticación de las redes neuronales se ha dado de manera progresiva, respondiendo a las necesidades de las especies, Así por ejemplo en los artrópodos y vertebrados, la selección y mantenimiento de las conductas motoras, implican mucho más que reflejos, pues son necesarios ganglios cerebrales para controlar las funciones motoras adaptativas ubicados en regiones del cerebro anterior. En los insectos dichas regiones comprenden centros interconectados conocidos como complejos centrales, que en los vertebrados se complejizaron para convertirse en los ganglios basales, los cuales controlan los comportamientos voluntarios. Se sabe que la interrupción de los mismos crea signos patológicos como ocurre en la ataxia, o las enfermedades de Parkinson y de Huntington (Flore, Dolan, Strausfeld, & Hirth, 2015).

Mientras que otras especies generaron adecuaciones a los modelos generales ya previstos en la naturaleza, como es el caso de los bigotes en los roedores los cuales maximizan los modelos internos de comprensión del entorno, a través del movimiento y la localización más allá de cuerpo, lo que resultó la posibilidad de tocar objetos evitando el contacto físico, lo cual implicó el desarrollo de una red de sensores delicados alrededor de la boca de los animales (Gordon & Ahissar, 2012), en los humanos el desarrollo fue más interno, ejemplo de ello es el órgano de Corti que convirtió el pelo en un sensor gravitacional (Duncan & Fritsch, 2012), creando redes cognitivas complejas, capaces no solo de crear movimientos finos y secuenciarlos en la neocorteza (Abernethy, Kippers, Hanrahan, Pandey, & McManus Mackinnon, 2013; Jékely et al., 2015), sino de crear representaciones movimientos viso-espaciales para responder de modo eficaz ante el ambiente (Giese & Rizzolatti, 2015; Groh, 2014).

Evolución del movimiento en el sistema nervioso humano

Existen dos modelos conceptuales que explican el origen del sistema nervioso. Uno es el modelo de Entrada-Salida y el otro modelo es de Coordinación Interna. Ambos enfatizan diferentes aspectos, pero ambos consideran al movimiento como base de las interacciones de las redes neuronales, que en sí mismas requieren de movimiento e intercambio de información. Sin embargo, a diferencia del modelo tradicional que entiende a una neurona como aquella que da como resultado una sinapsis, actualmente se hace notar que existe también células neuro-secretoras que influyen a otras células vía paracrina o señalización hormonal (Jékely et al., 2015) sin embargo, aún en especies poco complejas, la coordinación motora les permite la pervivencia (Roth, 2015; Flore et al., 2015)

En este sentido, autores como Herculano-Houzel (2012, 2014) proponen que el aumento del radio glía/neurona, se explica por la necesidad evolutiva de desarrollar respuestas cada vez más sofisticadas, pero no es claro si el ambiente creó dicho aumento en la proporción de estructuras de soporte, o si este desarrollo perceptual permitió tener mayor control sobre el ambiente y por ende modificarlo (Dzib Goodin, 2013a).

Lo que es factible observar, es que si bien las vías relacionadas a la coordinación de la percepción y la acción son generalmente presentadas como vías sensoriales que cruzan el tálamo, y que se vuelven jerárquicas a nivel cortical, lo que permite respuestas motoras o de memoria, a lo que se agrega la estrecha relación entre la audición y la visión que surge desde el nacimiento y que ha de volverse compleja con la interacción del ambiente (Galván Celis, Pechonkina, & Dzib-Goodin, 2014; Guellai, Streri, & Yeung, 2014; Brang, Miller, McQuire, Ramachandran, & Coulson, 2013).

Esta relación sensorio motriz no es solo física sino eléctrica, como Hari (2006) y Miller et al. (2011) explican, pues el ritmo mu en la corteza motora y la densidad de la mielinización que se desarrolla con la experiencia, lo cual explica la relación del circuito sensorio motor y la percepción del ambiente, a lo que Gentili et al. (2015) agregan que es posible encontrar cambios en la frecuencias entre la región pre frontal izquierda durante la planificación y ejecución de un movimiento, lo que sugiere que esta región no es necesaria para el reclutamiento de viso motor, una vez que se reconoce un plan de acción específico, por lo que se reclutan otras áreas, lo cual implica que el mecanismo percepción-acción surgió de manera separada a nivel evolutivo (Melkikh & Chesnokova, 2012; Little & Sommer, 2013).

Otra estructura relevante la constituyen el grupo de núcleos de los ganglios basales, estructuras que ya mencionamos con anterioridad, la cual es clave para el control del movimiento, misma que se ha conservado durante a evolución de los vertebrados por al menos 560 millones de años, no solo a nivel físico, sino en sus funciones neuroquímicas, específicamente GABAérgicas y sinápticas (Grillner, Robertson, & Stephenson-Jones, 2013).

Sin embargo, la creación de redes neuronales específicas para crear movimiento no fue suficiente, se volvió necesaria la posibilidad de modelarlo, para con ello crear estrategias específicas para consolidar acciones. Es por ello que surgieron las neuronas espejo que, creando cambios específicos durante la interacción social con el ambiente, y actúan como soporte de la plasticidad cerebral, creando circuitos funcionales, que implican componentes epigenéticos (Dzib Goodin, 2013b).

Evidencias neurológicas sugiere que la base neural de la praxis manual, incluyendo la pantomima y el uso de herramientas está estrechamente asociada con la simetría cerebral y es homologa al sistema de espejos en los primates, que les permite la imitación de conductas y con ello el aprendizaje (Corballis, Badzakova-Trajkov, & Häberling, 2011; Ferrari, Tramacere, Simpson, & Iriki, 2013).

Dicha modulación parecería que implica dar un paso a la toma de decisiones, sin embargo, los trabajos de Battaglia-Mayer, Ferrari-Toniolo, Visco y Comandini (2015) o bien Sclafani, Simpson, Suomi y Ferrari (2015), permiten entender el componente evolutivo de tal sofisticación, pues su análisis realizado tanto en monos como en humanos, explica que la cognición motora surge de una red parieto-frontal con dominio discreto del ojo y la mano bajo señales visuales, en las cuales, las neuronas son responsables de la coordinación entre la distancia de los objetos, y la precisión para alcanzarlos que implica operaciones guía y acciones espaciales, a lo que Guthrie, Lebiois, Garenne y Boraud (2013) agregan que para ello se requiere la toma de decisiones, y que esto recluta los ganglios cortico-basales con una circuito positivo y la retroalimentación directa del cuerpo estriado en un circuito negativo, y a todo ello se incorpora la necesidad de dopamina en las sinapsis del aprendizaje modulado a nivel cortico estriado, lo que coordina la capacidad de movimiento como respuesta a la entrada sensorial.

Ante tal nivel de perfección evolutiva, existe evidencia que las vías aferentes del tálamo representan la entrada principal a la neocorteza, a través de una ramificación de los axones que envían información hacia el tálamo y otros centros de salida del tronco encefálico y la medula espinal, que también se pueden ver influenciados por información transtálamica y de los centros motores del cerebro medio (Guillery, 2005).

Sin embargo, el control motor no sería posible sin un filamento bien conservado de diversas especies eucariotas, que ha permanecido sin cambio en los miles de millones de años que separan a las bacterias del ser humano, se trata de la actina, que participa en muchos procesos celulares (Gunning, Ghoshdostider, Whitaker, Poop, & Robinson, 2015) incluyendo la contracción muscular y la movilidad celular.

Origen del proceso motor

El origen de movimiento dirigido se cree surge por parte de proto-células durante los primeros momentos de la evolución de las especies, mismo que implicó la capacidad de orientación espacial y recepción de información ambiental, como muestra de ventaja evolutiva directa entre las células en un primer momento, y posteriormente sobre las especies (Pierce, Hutchinson, & Clack, 2013; Melkikh & Chesnokova, 2012).

A ello se tuvo que agregar la necesidad de interactuar con la gravedad pues se sabe que los movimientos de los brazos, ya sea horizontales o verticales sin importar los patrones temporales, implican velocidad. Esto debe ser analizado por el sistema nervioso mediante la integración de un campo de fuerza de gravedad para minimizar el gasto de energía a nivel muscular (Toma, Sciutti, Papaxanthis, & Pozzo, 2015). Ante esto es inevitable hacer mención que el movimiento requiere del manejo de las limitaciones gravitacionales y de inercia que limitan la libertad del cuerpo y los objetos que se manipulan (Crevecoeur, McInyre, Thonnard, & Lefèvre, 2014).

Eventualmente esto requirió la evolución de sensores que permiten la ubicación en el tiempo y el espacio, mismos que facilitaron la adquisición de información del entorno, lo cual está íntimamente relacionado con la selección natural y la adaptabilidad de las especies, y en este sentido explican Klyubin, Polani, y Nehaniv (2007) la maximización del flujo de información permite comprender la necesidad del circuito percepción-acción.

Más adelante en la historia evolutiva, fue necesario el desarrollo de extremidades que permitieron la locomoción en tierra. En este sentido Blob

et al., (2014) hicieron un análisis de los factores que llevaron a la diversificación de las extremidades entre algunas especies. Primero evaluaron el valor locomotor del fémur entre diversos linajes que incluían salamandras, ranas, tortugas, lagartijas, cocodrilos y marsupiales, y los compararon con especies que cuentan con extremidades diseñadas para correr como pájaros y mamíferos. Sus hallazgos muestran que la variabilidad de las extremidades y la capacidad de adaptación sobre el ambiente están relacionados, pues a menor capacidad de movilidad, menor costo en la manutención energética de las especies.

En el caso de los humanos, heredaron las ventajas del diseño y manutención genómica y fisiológica de los mecanismos de control motor de las especies que les precedieron en la historia evolutiva, y llevaron este proceso al límite de la perfección. No solo porque son bípedos con cerebros más complejos, lo que produce que el simple acto de mantenerse erecto al caminar implique un sofisticado control motriz, pero que, al mismo tiempo, implicó una mayor interacción sobre el ambiente (Melillo & Leisman, 2009; Dominici et al., 2011).

A ello se ha de agregar, que si bien no es claro como los movimientos rudimentarios de otras especies llegaron a tal nivel en los humanos, se asume que los patrones de control neuronal se suprimen durante el desarrollo, reemplazándolos por nuevos patrones.

En este sentido se han estudiado por ejemplo la actividad de las neuronas motoras del área lumbo-sacra y desde bebés hasta adultos y se encuentra que por cada patrón primitivo que un bebé muestra, es reemplazado por un patrón nuevo cuando niños y se diversifica cuando se alcanza la madurez motora (Gordon, Fonio, & Ahissar, 2014; Ivanenko et al., 2013; Buckner & Krienen, 2013), este mismo patrón se encuentra en ratas, gatos, macacos y gallinas de Guinea lo cual implica consistencia en la hipótesis de que las distancias filogenéticas y las diferencias morfológicas en la locomoción de diversas especies se deben a un ancestro común de la red neuronal (Flore et al., 2015; Dominici et al., 2011).

Los circuitos son tan claros y eficientes que cuando un movimiento se ejecuta incorrectamente de manera sistemática, ocurre un cambio en la conducta motora. Esto permite transferir habilidades de una mano a otra, procurando una adaptación visomotora (Block & Celnik, 2013), lo cual indica un aprendizaje heredado por generaciones.

Pero no solo ello, también se relaciona con las habilidades lingüísticas, musicales y matemáticas como mencionan Galván Celis et al. (2014), pues son dependientes de claves viso-espaciales-auditivas, y se ha encontrado que la percepción del discurso a nivel audiovisual, activa redes cerebrales que incluyen la corteza motora, para lograr la planeación y ejecución del discurso, así como otras áreas propioceptivas relacionadas con la producción del discurso. Estas regiones incluyen el área posterior superior de la circunvolución temporal y el surco, los pares operculares, la corteza premotora, la corteza primaria adyacente, la corteza somato sensorial y el cerebelo (Skipper, Nusbaum, & Small, 2005).

Genes y movimiento

No hay duda que la conquista del movimiento en las especies es el resultado de la mutación genómica, que permitió la regulación espacial y temporal (Dzib-Goodin, 2013b).

Fósiles y datos anatómicos comparativos especialmente de los cambios en la organización del código genómico, y por lo tanto de la regulación de genes, han permitido reconocer el impacto del movimiento en las especies, mismas que han producidos distintos tipos de células y variaciones anatómicas que permiten crear habilidades motoras específicas (Duncan & Fritsch, 2012). Uno de esos cambios a nivel genético y proteínico permitió la relación ojo-mano lo cual implicó el reconocimiento del espacio, para la construcción de movimientos precisos (Chen, Krinsky, & Long, 2013).

Se comprueba la implicación genética debido a la relación del movimiento con los ciclos circadianos, pues se ha encontrado que más de 2300 genes de los músculos esqueléticos son expresados en patrones circadianos (Harmann, Schroder, & Esser, 2014), por lo que comienza a consolidarse evidencia significativa que indica la contribución del sueño para la consolidación de la memoria y habilidades motoras (Debarnot, Castellani, Valenza, Sebastiani, & Guillot, 2011). Esto debido a la expansión cerebral que requirió de procesos esenciales para el mantenimiento y consolidación de aprendizaje y adiciones a las áreas funcionales con el fin de mantener una constante evolución que produjo cambios en el nicho ecológicos de los homínidos, lo que a su vez demanda más recursos cerebrales para adaptarse (Doyon et al., 2009).

Movimiento, aprendizaje y procesos cognitivos

La evolución de los procesos cognitivos, sin duda está ligada con la intención y el movimiento. Así lo explican Iriki, y Taoka (2011) quienes proponen que el aumento de la capacidad de los órganos como respuesta a la adaptación debido a las presiones ecológicas, parece ser una tendencia biológica y evolutiva a la cual el cerebro de los homínidos no puede escapar. Esto porque la integración multi-sensorial y la transformación de las coordenadas para el control del movimiento que permiten alcanzar objetos en el espacio, resultó tan importante para las especies, que pasó a ser parte esencial del sistema nervioso. A lo que se propone que dicha mejora neuronal dio paso al procesamiento de información abstracta, separada de la restricción física real, mediante la aplicación y re-uso de los principios existentes para el procesamiento de la información espacial para realizar nuevas funciones mentales, cuyo paso más reciente se representa en el desarrollo del lenguaje (Kendal, Tehrani, & Odling-Smee, 2011).

La manipulación intencionada de la imagen del cuerpo en el espacio, fue un proceso necesario para el uso de herramientas, mismas que facilitaron el cambio del ambiente y la supervivencia, esto aceleró vínculos interactivos entre los procesos neuronales y cognitivos, pues requieren de diversas coordenadas corporales y espaciales, así como las relaciones lógicas y secuenciales de los componentes, lo cual permitió mejoras en los hábitats (Iriki & Taoka, 2008).

Este ambiente humano modificado ejerció presión sobre las generaciones posteriores, tal vez con el reclutamiento de diversos órganos, lo que epigenéticamente induce la plasticidad cerebral, y por ende flexibilizó los mecanismos del aprendizaje. De esta forma, la información genómica extra podría ser transmitida a la siguiente generación a través de interacción entre los dominios ecológico, neuronal y cognitivo, lo cual permite comprender al cerebro humano como parte de un ecosistema global en la evolución (Susuki & Arita, 2004).

Con esto, los seres humanos lograron crear habilidades en los dominios ecológicos, cognitivos y neuronales, por lo que la actividad cognitiva superior puede ser vista como un componente del ecosistema terrestre. Para ello Iriki y Taoka (2011) proponen que tres clases de nichos crearon interdependencias co-evolutivas, explicando que el movimiento, dio paso a la creación de herramientas, lo cuales requieren de un uso específico y toma de decisiones tanto de control motriz como metas de uso. La repetición y perfeccionamiento por parte de muchas generaciones, abrió la plasticidad de las redes neuronales, pues como se observa en las redes neuronales artificiales, no hay razón para que el flujo de información recorra un solo sentido (Buckner & Krienen, 2013; Abernethy et al., 2013).

Tales interacciones podrían haber acelerado la evolución de los homínidos, que en un principio parecen productos solo de la selección natural, pero no se pueden hacer de lado los cambios ambientales exógenos (Chen, Krinsky, & Long, 2013). En este sentido, su propuesta de la evolución de la cognición supone que los cambios ecológicos en los hábitats ocurrieron no solo por los cambios ambientales, sino por la evolución cognitiva que, con las consiguientes presiones de selección, actúa sobre la base neuronal que interactúa en las adaptaciones del comportamiento en dicho entorno modificado. A su vez, nuevas funciones cerebrales constituyen la base para una mayor innovación en el funcionamiento cognitivo y ello agrega nuevas adecuaciones en el nicho ecológico, gracias a la conquista del espacio a partir del movimiento, que abre la necesidad del aprendizaje y la memoria (Iriki & Taoka, 2008, 2011).

Desde esta perspectiva, debido a la interacción del cuerpo con el ambiente, se presenta la sinestesia, que se define como la sensación secundaria o asociada que se produce en una parte del cuerpo a consecuencia de un estímulo aplicado en otra, la cual se asocia de forma involuntaria a los meses del año o de formas espaciales en 2 o 3 dimensiones, es decir la relación espacio-tiempo. Esto permite como consecuencia la habilidad mental para rotar objetos a nivel imaginario, y las memorias espacial y verbal de trabajo, habilidades que se volvieron indispensables para los procesos cognitivos más sofisticados, como los aplicados en la ciencia, la tecnología y la innovación (Brang et al., 2013; Price & Pearson, 2013).

Conclusión

La relación del movimiento y el aprendizaje, es un triunfo genético evolutivo que tomó las bases proteínicas (como en el caso de la actina), y genéticas más primitivas de las especies, combinando la necesidad de responder en el ambiente, creando circuitos positivos y negativos a nivel cerebral, con la finalidad de la comprensión de la distancia, el tiempo y manipulación de herramientas, para la mejora del entorno ecológico. Con este entorno, el

circuito percepción-acción permitió a las especies la oportunidad de ir de un lugar a otro, lo que implicó la necesidad de navegación en el espacio, el reconocimiento viso-espacial y la creación o calibración de sensores capaces de responder ante los nuevos entornos y de respuestas a ciclos naturales tales como los circadianos. Todo ello, más tarde, facilitó procesos superiores generados en el cerebro humano.

Ante esto, el cerebro humano fue desarrollando circuitos específicos para el beneficio de la percepción del espacio y el control muscular, que implicó el reclutamiento de la memoria que, al igual que el aprendizaje motor, se consolidan durante el sueño y se codifica a nivel genético por ciclos circadianos, lo cual apunta a una diversificación temprana en el resto de las especies. De ahí que sea posible de comprender las implicaciones del movimiento en los procesos cognitivos, tal es el caso del pensamiento lingüístico, mismo que ha demostrado una relación estrecha con las cuerdas vocales, que permiten escuchar a nivel inconsciente ya sea la palabra o el discurso que está a punto de producirse. Esto beneficia sobre todo a los niños, como circuito de retroalimentación de la producción lingüística.

Si bien el efecto Baldwin no pudo ser comprobado en su momento, la combinación de los omics permite reconocer que existen procesos que pueden ser compartidos por las generaciones, siempre y cuando las condiciones ambientales sean similares. Ante ello, cabe reconocer esto en el impacto de los principios a nivel educativo, que carecen de sentido a la luz de los procesos evolutivos del aprendizaje. A ello se agrega la concepción que los niños aprenden mejor si permanecen sentados, que va en contra de la evolución. En este sentido, se aplican en diversos espacios educativos, acciones motoras que permitan reconocer el proceso espacio-temporal en niños con problemas en la adquisición de aprendizaje, con el fin de estimular vías que por el ambiente en que se desenvuelve pueden estar hipoactivadas.

Referencias

- Abernethy, B., Kippers, V., Hanrahan, S. J., Pandy, M. G., McManus, A. M., Mackinnon, L. (2013). *Biophysical foundation of human movement*. Human Kinetics. USA.
- Battaglia-Mayer, A., Ferrari-Toniolo, S., & Visco-Comandini, F. (2015). Timing and communication of parietal cortex for visuomotor control. *Current Opinion in Neurobiology*, 33, 103-109.
- Blob, R. W., Espinoza, N. R., Butcher, M. T., Lee, A. H., D'Amico, A. R., Baig, F., & Sheffield, K. M. (2014). Diversity of limb-bone safety factors for locomotion in terrestrial vertebrates: evolution and mixed chains. *Integrative & Comparative Biology*, 54(6), 1058-1071.
- Block, H., & Celnik, P. (2013). Stimulating the cerebellum affects visuomotor adaptation but not intermanual transfer of learning. *The Cerebellum*, 12(6) 781-793.
- Brang, D., Miller, L. E., McQuire, M., Ramachandran, V. S., & Coulson, S. (2013). Enhanced mental rotation ability in time-space synesthesia. *Cognitive Processing*, 14(4) 429-434.
- Buckner, RL., Krienen, FM. (2013) The evolution of distributed association networks in the human brain. *Trends in Cognitive Science*, 17(12), 648-665.
- Corballis, M. C., Badzakova-Trajkov, G., & Häberling, I. S. (2011). Right hand, left brain: genetic and evolutionary bases of cerebral asymmetries for languages and manual action. *Wires Cognitive Science*, 3(1), 1-17. Chen, S., Krinsky, B. H., & Long, M. (2013). New genes as drivers of phenotypic evolution. *Nature Reviews Genetics*, 14, 645-660.
- Crevecoeur, F., McInyre, J., Thonnard, J. L., & Lefèvre, P. (2014). Gravity-dependent estimates of object mass underlie the generation of motor commands for horizontal limb movements. *Journal of Neurophysiology*, 112(2), 384-392.
- Debarnot, U., Castellani, E., Valenza, G., Sebastiani, L., & Guillot, A. (2011). Daytime naps improve motor imagery learning. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 11(4), 541-550.
- Dominici, N., Ivanenko, Y. P., Cappellini, G., D'Avella, A., Mondì, V., Cicchese, M., Fabiano, A., Silei, T., Di Paolo, A., Giannini, C., Poppele, R. E., & Lacquaniti, F. (2011). Locomotor primitives in newborn babies and their development. *Science*, 334(6058), 997-999.
- Doyon, J., Korman, M., Morin, A., Dostie, V., Hadj Tahar, A., Benali, H., Karni, A., Ungerleider, L. G., & Carrier, J. (2009). Contribution of night and day sleep vs. simple passage of time to the consolidation of motor sequence and visuomotor adaptation learning. *Experimental Brain Research*, 195(1), 15-26.
- Duncan, J. S., & Fritsch, B. (2012). Perception: Innovations that aggregate single hair cells into the ear and transform a gravistatic sensor into the organ of Corti *The Anatomical Record*, 295, 1760-1774.
- Dzib Goodin A. (2013a). La arquitectura cerebral como responsable del proceso de aprendizaje. *Revista Mexicana de Neurociencia*, 14(2), 81-85.
- Dzib-Goodin, A. (2013b). La evolución del aprendizaje: más allá de las redes neuronales. *Revista Chilena de Neuropsicología*, 8(1), 20-25.
- Ferrari, P., Tramacere, A., Simpson, E. A., & Iriki, A. (2013). Mirror neurons through the lens of epigenetics. *Trends in Cognitive Science*, 17(9), 450-457.
- Flore, V. G., Dolan, R. J., Strausfeld, N. J., & Hirth, F. (2015). Evolutionary conserved mechanism for the selection and maintenance of behavioral activity. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Science*, 370(1684). doi: 10.1098/rstb.2015.0053
- Galván Celis, V., Pechonkina, I. M., & Dzib-Goodin, A. (2014). La relación entre los procesos de lecto-escritura y la música desde la perspectiva neurocognitiva. *Revista Chilena de Neuropsicología*, 9(1-2) 21-24.
- Jékely, G., Kreijzer, F., & Godfrey-Smith, P. (2015). An option space for early neural evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Science*, 370 (1684) doi: 10.1098/rstb.2015.0181
- Gentili, R. J., Bradberry, T. J., Oh, H., Constanzo, M. E., Kerick, S. E., Contreras-Vidal, J. L., & Hatfield, B. D. (2015). Evolution of cerebral cortico-cortical communication during visuomotor adaptation to a cognitive-motor executive challenge. *Biological Psychology*, 105, 51-65.
- Giese, MA., & Rizzolatti, G. (2015). Neural and computational mechanisms of action processing: interaction between visual and motor representations, *Neuron*, 88(1), 167-180.
- Gordon, G., & Ahissar, E. (2012). Hierarchical curiosity loops and active sensing. *Neural Networks*, 32, 119-129. doi: 10.1016/j.neunet.2012.02.024
- Gordon, G., Fonio, E., & Ahissar, E. (2014). Learning and control of exploration primitives. *Journal of Computational Neuroscience*, 37(2), 259-280.
- Grillner, S., Robertson, B., & Stephenson-Jones, M. (2013). The evolutionary origin of the vertebral basal ganglia and its role in action selection. *The Journal of Physiology*, 591, 5425-5431. doi: 10.1113/j.physiol.2012.246660
- Groh, J. M. (2014). *Making Space: How the brain knows where things are*. Harvard University Press. USA.
- Guellai, B., Streri, A., & Yeung, H. H. (2014). The development of sensorimotor influences in the audiovisual speech domain: some critical questions. *Frontiers in Psychology*, 5. doi: 10.3389/fpsyg.2014.00812
- Guillery, R. W. (2005). Anatomical pathways that link perception and action. *Progress in Brain Research*, 148, 235-256.
- Gunning, P. W., Ghoshdastider, U., Whitaker, S., Poop, D., & Robinson, R. C. (2015). The evolution of compositionally and functionally distinct actin filaments. *Journal of Cell Science*, 128, 2009-2019, doi: 10.1242/jcs.165563
- Guthrie, M., Lebiois, A., Garenne, A., & Boraud, T. (2013). Interaction between cognitive motor cortico-basal ganglia loops during decision-making: a computational study. *Journal of Neurophysiology*, 109(12), 3025-3040.
- Harfmann, B. D., Schroder, E. A., & Esser, K. A. (2014). Circadian Rhythms, the molecular clock, and skeletal muscle. *Journal of Biological Rhythms*. doi: 10.1177/0748730414561638
- Hari, R. (2006). Action-perception connection and the cortical mu rhythm. *Progress in Brain Research*, 159, 253-260.
- Herculano-Houzel, S. (2014). The glia/neuron ratio: how it varies uniformly across brain structures and species and what that means for brain physiology and evolution. *Glia*, 62(9), 1377-1391.
- Herculano-Houzel, S. (2012). The remarkable, yet not extraordinary, human brains as a scaled up primate brain and its associated cost. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 109(S1), 10661-10668.
- Hinton, G. E. (1987). How learning can guide evolution. *Complex Systems*, 1, 495-502.

- Iriki, A., & Taoka, M. (2008). The neuroscience of primate intellectual evolution: natural selection and passive and intentional niche construction. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Science*, 363(1500) doi: 10.1098/rstb.2008.2274
- Iriki, A., & Taoka, M. (2011). Triadic (ecological, neural, cognitive) niche construction: a scenario of human brain evolution extrapolating tool use and language from the control of reaching actions. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Science*, 367(1585). doi: 10.1098/rstb.2011.0190
- Ivanenko, Y. P., Dominici, N., Cappellini, G., Di Paolo, A., Giannini, C., Poppele, R. E., & Lacquaniti, F. (2013). Changes in the spinal segmental motor output for stepping during development from infant to adult. *The Journal of Neuroscience*, 33(7), 3025-3036.
- Jékely, G., Kreijzer, F., & Godfrey-Smith, P. (2015). Adoption space for early neural evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Science*, 370 (1684). doi: 10.1098/rstb.2015.0181
- Kendal, J., Tehrani, J. J., & Odling-Smee, J. (2011). Human niche construction in interdisciplinary focus. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Science*, 366(1566). doi: 10.1098/rstb.2010.0306
- Klyubin, A., Polani, D., & Nehaniv, C. (2007). Representation of space and time in the maximization of information flow in the perception-action loop. *Neural Computation*, 19(9), 2387-2432.
- Little, D. Y., & Sommer, F. T. (2011). Learning in embodied action-perception loops through exploration. *arXiv*. Disponible en: <http://arxiv.org/pdf/1112.1125v2.pdf>
- Little, D. Y., & Sommer, F. T. (2013). Learning and exploration in action-perception loops. *Frontiers in Neural Circuits*, 7(37). doi: 10.3389/fncir.2013.00037
- Melillo, R., & Leisman, G. (2009). Why the brains works the way it does: evolution and cognition from movement. In R. Melillo and G. Leisman. (2010) *Neurobehavioral Disorders of Childhood: An Evolutionary Perspective*. Pp 33-46. Springer Science +Business Media, US.
- Miller, D. J., Duka, T., Simpson, C. D., Schapiro, S. J., Baze, W. B., McArthur, M. J., Fobbs, A. J., Sousa, A. M. M., Šestan, N., Wildman, D. E., Lipovich, L., Kuzawa, C. W., Hof, P. R., & Sherwood, C. C. (2011). Prolonged myelination in human neocortical evolution. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 109(41), 16480-16485.
- Melkikh, A., & Chesnokova, O. (2012). Origin of the directed movement of protocells in the early stages of the evolution of life. *Origins of Life and Evolution Biospheres*, 42(4), 317-331.
- Nolfi, S., & Parisi, D. (1994). Good teaching inputs do not correspond to desired responses in ecological neural networks. *Neural Processing Letters*, 1, 2(11/94), 1-4.
- Nolfi, S., & Parisi, D. (1996). Learning to adapt to changing environments in evolving neural networks. *Adaptive Behavior*, 5(1), 75-88.
- Pierce, S. E., Hutchinson, J. R., & Clack, J. A. (2013). Historical perspectives on the evolution of tetrapodomorph movement. *Integrative & Comparative Biology*, 53(2), 209-223.
- Price, M. C., & Pearson, D. G. (2013). Toward a visuospatial developmental account of sequence-space synesthesia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 689. doi: 10.3389/fnhum.2013.00689
- Roth, G. (2015). Convergent evolution of complex brains and high intelligence. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Science*, 370(1684). doi: 10.1098/rstb.2015.0049
- Saegusa, R., Metta, G., & Sandini, G. (2012). Body definition based o visuomotor correlation. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 59(8), 3199-3210.
- Sclafani, V., Simpson, E. A., Suomi, S. J., & Ferrari, P. F. (2015). Development of space perception in relation to the maturation of the motor system in infant rhesus macaques (*Macaca mulatta*). *Neuropsychologia*, 70, 429-441.
- Skipper, J., Nusbaum, H. C., & Small, S. L. (2005). Listening to talking faces: motor cortical activation during speech perception. *NeuroImage*, 25(1), 76-89.
- Susuki, R., & Arita, T. (2004). Interactions between learning and evolution: The outstanding strategy generated by the Baldwin effect. *Biosystems*, 77(1-3), 57-71.
- Toma, S., Sciutti, A., Papaxanthis, C., & Pozzo, T. (2015). Visuomotor adaptation to a visual rotation is gravity dependent. *Journal of Neurophysiology*, 113(6), 1885-1895.
- Wray, G. A. (2015). Molecular clocks and the early evolution of meta-zoan nervous systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Science*, 370(1684) doi: 10.1098/rstb.2015.0046