Imagenología Cerebro/Corporal Móvil (MoBI): Desafíos y oportunidades para la implementación de programas de investigación basados en la aproximación 4E de la cognición

Francisco J. Parada^{1,*}, Aitana Grasso-Cladera^{1,2}, Alejandra Rossi¹, Stefanella

Costa-Cordella^{1,3} & Nikolas F. Fuchs¹

¹ Centro de Estudios en Neurociencia Humana y Neuropsicología. Facultad de Psicología, Universidad Diego Portales. Santiago, Chile

² Escuela de Psicología. Facultad de Psicología, Universidad Diego Portales. Santiago, Chile

³ Centro de Estudios en Psicología Clínica y Psicoterapia. Facultad de Psicología, Universidad Diego Portales. Santiago, Chile

Running title: MoBI & the 4E approach to cognition

***Autor para correspondencia:**

Francisco J. Parada, Ph.D.

Laboratorio de Neurociencia Cognitiva y Social. Facultad de Psicología, Universidad Diego Portales. Santiago, Chile, 8370076

Email: francisco.parada@udp.cl

Phone: +56 22 676 2578

Contribuciones y Agradecimientos: FJP conceptualizó y escribió la primera versión del manuscrito. FJP, AG, AR, NFF escribieron y editaron la presente versión del manuscrito.

Fuentes de financiamiento: El presente trabajo cuenta con el apoyo financiero del proyecto N°11180620 otorgado por el concurso Iniciación en Investigación del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT), financiado por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) del Ministerio de Educación del Estado de Chile a FJP.

Abstract

El desarrollo reciente de las ciencias psicológicas y cerebrales ha avanzado enormemente nuestro entendimiento del fenómeno cognitivo. Para lograr esto, el uso de experimentos de laboratorio ha sido esencial, sin embargo estos experimentos usualmente se encuentran lejanos a la experiencia vivida en el mundo real. Evidencia actual indica que una de las dimensiones centrales de la cognición no ha tenido presencia en la agenda de investigación teórica y empírica de las ciencias psicológicas y cerebrales durante los últimos 50 años: las dinámicas del sistema cerebro/cuerpo en acción en el mundo. Una nueva aproximación epistémico/metodológica promete un cambio radical en el contexto actual.

La presente revisión parte presentando la motivación teórica subyacente a la imagenología cerebro/corporal móvil. Posteriormente presentamos evidencia empírica que avala la necesidad del cambio paradigmático y revisamos los avances metodológicos que lo han hecho posible. Finalmente presentamos los grandes desafíos y oportunidades para la Psicología del siglo XXI.

Keywords: MoBI, Cerebro, Cuerpo, 4E-Cognition, Chile

Introducción

El fenómeno cognitivo se caracteriza por su complejidad y multidimensionalidad. Comportamientos adaptativos y adecuados al contexto presente precisan una cognición que debe integrar información sensoriomotora proveniente de múltiples modalidades junto con la historia de interacciones del individuo y posibles eventos futuros. Esto se logra mediante el uso de procesos de retroalimentación en tiempo real que guían, planifican, predicen y comparan los estados sensoriomotores (Wiese & Metzinger, 2017). Dichos procesos han sido conceptualizados como cognición en su estado natural (natural cognition en inglés) (Gramann et al., 2014; Hutchins, 1995).

La dinámica realidad ha sido conocida desde los comienzos del estudio de la mente, desde el antiguo Fisicalismo Indio (Bhattacharya, 2002) hasta el debate entre Platón y Anaxágoras (Plato, 1911). Sin embargo, la aproximación tradicional al estudio de la cognición recae en la adquisición de datos unimodales utilizando simples tareas motoras en relación a situaciones relativamente estáticas, enmarcadas dentro de un laboratorio, mientras los participantes yacen sentados o acostados en aislamiento (FIGURA 1). La principal ventaja de esta aproximación se encuentra en el aparente control que tales situaciones proveen a los científicos, mientras que la principal desventaja refiere a la pérdida de múltiples dimensiones que componen el mundo real no consideradas por este tipo de situaciones.

En el presente artículo, revisamos una aproximación alternativa -y complementaria- para el estudio del fenómeno cognitivo en el siglo XXI. Esta aproximación es conocida como Imagenología Cerebro/Corporal Móvil (MoBI, *Mobile Brain/Body Imaging*) (Makeig et al.,

2009). La primera década de MoBI ha sido marcada por el desarrollo tecnológico tanto a nivel de *hardware* como de *software* que permiten adquirir señales cerebrales (e.g. electroencefalografía), conductuales (e.g. eye-tracker) y/o corporales (e.g. electrocardiografía) en tiempo real mientras los participante(s) pueden actuar naturalmente (FIGURA 1). MoBI se ha desarrollado principalmente en universidades de Estados Unidos y Europa, con los pioneros siendo la Universidad de California en San Diego y la Universidad Técnica de Berlín. Consideramos que la aproximación que ofrece MoBI al estudio de la cognición no sólo complementa el trabajo tradicional en laboratorio, sino que hace más concreta la posibilidad de avanzar hacia el desarrollo de intervenciones y aplicaciones. Comenzamos entonces por abordar los supuestos teóricos que subyacen la aproximación MoBI. Posteriormente, revisaremos los avances tecnológicos que hacen posible la implementación de MoBI. Finalmente discutiremos las oportunidades y desafíos que MoBI presenta para el estudio de la cognición desde el marco de las 4E.

¿Es la cognición un fenómeno corporeizado, extendido e integrado para la acción?

La idea de que la cognición es un fenómeno biológico, producto del cuerpo vivido de los agentes cognitivos es uno de los argumentos en el clásico problema mente/cuerpo (Bunge, 2014; Feyerabend, 1970; Plato, 1911).

Sin embargo, la ciencia cognitiva tradicional se basa en un modelo representacional y computacional de la mente, el cual propone/concibe a la mente como un tipo de procesamiento de información que consiste en la manipulación sintáctica de estructuras mentales y/o simbólicas

abstractas (Gardner, 1987; Rossi et al., 2019). Otra propuesta del modelo tradicional es que la cognición sería un proceso internalista, completamente determinado por su función y que ocurre en una unidad de procesamiento central. Es decir, ocurre -ontológicamente- sólo en el cerebro (Adams & Aizawa, 2001).

En contraste con lo anterior, en la década del 1990 se revitalizan conceptos de la primera mitad del siglo XX (Berthoz, 2008; Gibson, 2014; Merleau-Ponty, 1976) y se proponen ideas como la mente “enactiva”, que enfatiza la relación dinámica entre mente, cuerpo y medio ambiente (Varela et al., 1991) o la mente “extendida”, que enfatiza la conexión de los agentes cognitivos con el mundo (Clark & Chalmers, 1998; Flor & Hutchins, 1991).

Así, se propone la cognición como un fenómeno arraigado en la biología, extendido hacia el mundo físico y socio-cultural, integrado con su nicho ecológico y acoplado activamente *con* y *en* el mundo exterior.

Recientemente, se ha propuesto que este marco de trabajo se puede unificar dentro del paradigma de la cognición 4E (Embodied, Extended, Embodied, Enactive). No obstante, discutir las múltiples dimensiones e implicancias del enfoque 4E excede el objetivo del presente manuscrito, junto con la presente edición especial dirigimos al lector a revisar la propuesta 4E en profundidad (Menary, 2010; Newen et al., 2018).

Una implicancia fundamental de esta postura es que la cognición es producto de procesos tanto cerebrales como extra-craneales. Dentro de los procesos extra-craneales se consideran ambas dinámicas corporales (sistema cerebro/cuerpo) y ecológicas (sistema cerebro/cuerpo-en-el-mundo). Uno de los problemas que surgen con esta propuesta es acerca de la *constitucionalidad* del fenómeno cognitivo; es decir, ¿qué procesos *constituyen* la mente?. Por

ejemplo, cuando un baterista toca su instrumento, utiliza procesos neurales junto con todo su cuerpo para poder llevar a cabo el acto musical, sin embargo, uno podría argumentar de que el acoplamiento mano-baqueta-tambor son sólo procesos *habilitantes*, no *constitutivos* del proceso cognitivo subyacente a tocar la batería. El debate acerca la naturaleza *constitutiva*, *habilitante* o *contextual* de procesos extra-craneales en la cognición aún continúa (Adams & Aizawa, 2001; De Jaegher et al., 2010).

Si bien a nivel filosófico el debate entre la ciencia cognitiva tradicional y la propuesta 4E no está cerrado, la Ciencia Cognitiva experimental se encuentra con un dilema epistémico/metodológico. En varios puntos del siglo XX diversos científicos experimentales manifestaban su preocupación por el estudio de la cognición en contextos reducidos y poco naturales (Bronfenbrenner, 1977; Brunswik, 1943; Neisser, 1976). Estos estudios *reduccionistas* de laboratorio, podrían estar midiendo dinámicas que no se asemejan a la actividad que ocurre cuando los agentes se comportan en el mundo real (Bronfenbrenner, 1977; Gibson, 2014).

[ó ... la preocupación por la falta de naturalidad en el estudio de la cognición fue manifestada por diversos científicos experimentales a lo largo del s. XX. Se argumentaba que el reduccionismo en los estudios de laboratorio podría estar midiendo dinámicas no semejantes al comportamiento de los agentes actuando en el mundo real]

Estas preocupaciones epistemológicas fueron encontrando evidencia a medida que la metodología neurocientífica avanzaba en pos de acceder a preguntas más complejas. La evidencia paradigmática de este concepto proviene de pacientes con agnosia visual quienes, a pesar de no poder percibir características físicas de los objetos como tamaño, color o forma, son capaces de ajustar sus movimientos corporales al interactuar con ellos (Goodale et al., 1991).

Esto sugiere que los procesos cognitivos difieren dependiendo de la acción que se lleva a cabo. Este tipo de estudios demanda que -paralelamente al debate filosófico- se integre el *contexto* al estudio de la mente. ✓

La relación entre el contexto y las dinámicas mentales

La aproximación de las 4E para la ciencia cognitiva demanda -desde el nivel teórico- la investigación de la mente en situaciones ecológicamente válidas. Asimismo, evidencia teórica reciente indica que el contexto conductual y la agencia tienen una gran influencia sobre diversos procesos cognitivos (Chrastil & Warren, 2012). Investigación en modelos animales revela una interdependencia entre las dinámicas cognitivas y la exploración activa del medio ambiente. Por ejemplo, Maimon y colaboradores (2010) trabajaron con las propiedades de interneuronas visuales durante el vuelo de moscas (*Drosophila Melanogaster*), identificando que la respuesta de estas células dobla su actividad cuando las moscas vuelan en comparación a cuando se encuentran reposo. Esta activación es flexible en relación al estado locomotor debido a un incremento de inputs sinápticos en las células del sistema vertical visual cuando se produce el vuelo. Similarmente, estudios realizados con ratas dan cuenta de cambios en ondas Theta hipocampales, las que fueron asociadas a la aproximación al término de la tarea sensoriomotora y la obtención de la recompensa una vez alcanzado el objetivo (Sinnamon, 2006). Asimismo, en relación a promedios de amplitud y frecuencia, fueron menores aquellos asociados al contacto con la palanca (procesos que determinan la disminución locomotora), en comparación con la presentación de recompensas y el comportamiento consumatorio.

De igual forma, estudios realizados con primates no-humanos (*Macaca Mulatta*), de evaluación de tareas de memoria espacial realizadas por dos grupos de monos (sin lesión estructural y con lesión hipocampal selectiva), comparan el desempeño de los grupos y reafirman el rol del hipocampo en la retención de información espacial en monos. Esto se debe a que los monos normales presentaban una tendencia a recurrir a los sitios donde previamente habían encontrado comida en contraposición al grupo que presentaba la lesión, y a la mejoría del rendimiento en la detección de la recompensa luego del entrenamiento, a pesar de que el grupo de monos con lesión tendía a olvidar rápidamente la ubicación de la misma (Hampton et al., 2004). En contraste, al comparar un grupo con lesión en la formación hipocampal y otro con lesión selectiva de la región parahipocampal, se identifica que la dependencia en la realización de este tipo de tareas está asociada a la región parahipocampal posterior más que a la formación hipocampal. Es decir, el grupo con lesión hipocampal no presentaban afecciones en su rendimiento, mientras que aquellos con lesión en la región parahipocampal sí presentaban déficits en la realización de tareas de memoria visual (Malkova & Mishkin, 2003).

Así, los datos provenientes de múltiples especies sugieren que las dinámicas cerebrales son interdependientes de la actividad sensorial, motora, cognitiva y del contexto medioambiental, pero aún no queda claro si la relación cerebro/cuerpo/mundo es de carácter *constitutiva* para la cognición o simplemente corresponde a interacciones de habilitantes o contextuales (De Jaegher et al., 2010). Este debate acerca del posible estatus no-causal de la relación entre partes en un sistema (Craver, 2007) o de la relación dinámica que existe entre componentes y su causalidad recíproca (Leuridan, 2012) aún no está resuelto. Hasta ahora, limitantes tecnológicas mantenían a

la ciencia en un rol pasivo frente a este debate. A continuación revisamos avances recientes que buscan obtener datos respecto al rol causal del sistema cerebro/cuerpo-en-el-mundo.

Imágenes funcionales y estructurales del sistema cerebro/cuerpo-en-el-mundo

La necesidad de adquirir datos (neuro)fisiológicos en contextos ecológicos ha estado presente desde principios del siglo XX, tanto a nivel teórico como empírico. Además, el avance teórico que propone el marco de trabajo de las 4E, ha exacerbado esta necesidad. Sin embargo existen limitantes que van más allá de la teoría. Estas limitantes son de carácter técnico/metodológico y son la causa principal que atrapa a la ciencia cognitiva exclusivamente dentro de los laboratorios. Avances tecnológicos como la invención de la electroencefalografía (EEG) por Hans Berger en (1929) y el desarrollo de la resonancia magnética funcional (fMRI) a principios de la década de 1990 (Bandettini et al., 1992), han cambiado la conceptualización del operar del sistema nervioso central. La actual demanda teórica que ofrece el enfoque de las 4E para el estudio de la cognición encuentra -finalmente- una posibilidad concreta de realización mediante el desarrollo de nuevas tecnologías. En la presente sección procedemos a revisar los principales avances metodológicos que facilitan la implementación de MoBI.

Electrofisiología Cognitiva Móvil

La mayor cantidad de avances tecnológicos se han reflejado en técnicas basadas en mediciones electrofisiológicas. Estas técnicas cuentan con alta resolución temporal, los que los hace adecuados para estudiar fenómenos cognitivos. A continuación discutimos las 2 técnicas más relevantes. Comenzamos con el EEG dada su gran prevalencia en los laboratorios de

neurociencia humana en Chile. Posteriormente nos enfocamos en la magnetoencefalografía (MEG), que si bien no existe en la región, presenta una gran oportunidad para el futuro de MoBI+4E.

Electroencefalograma (EEG)

El electroencefalograma (EEG) permite la detección y visualización gráfica de la actividad eléctrica generada por la actividad sincronizada de millones de neuronas en el cerebro, la cual es captada por electrodos posicionados a lo largo del cuero cabelludo. Esta técnica de neuroimagen se caracteriza por ser no invasiva, superando las limitaciones éticas en la investigación en humanos que presentan técnicas de carácter invasivo. Empero, el EEG sólo provee de un mapeo general en lo que a resolución espacial se refiere, debido a que la localización de los electrodos, por fuera del tejido del cuero cabelludo, dificulta la obtención de localizaciones estructurales precisas a partir de las señales eléctricas que recibe (Nunez & Srinivasan, 2006). Debido a estas ventajas, el EEG es una de las técnicas de neuroimagen más comunes en Chile y el mundo.

El EEG tiene una ventaja especial en el contexto de MoBI ya que en los últimos 10 años se han desarrollado dispositivos mucho más compactos, ligeros e inalámbricos, acercándose cada vez más a los estándares de nuevos diseños experimentales con mayor validez ecológica (Gramann et al., 2014; Ladouce et al., 2017; Makeig et al., 2009; Parada, 2018; Shamay-Tsoory & Mendelsohn, 2019). Es debido a esto que las metodologías también han evolucionado en su búsqueda de captar respuestas comportamentales, yendo desde mediciones simples como por ejemplo el presionar un botón a el desarrollo de tareas motoras sin restricciones debido a la portabilidad de los sistemas de EEG (Lim et al., 2011; Marin-Perianu et al., 2013),

complementando con el uso de otras tecnologías como por ejemplo cámaras de video para captar el movimiento. Dicha evolución ha permitido que el EEG se utilice para captar procesos cognitivos en la medida en que ocurren como comportamientos naturales que ocurren en el mundo real, existiendo amplia evidencia a favor de este tipo de diseños experimentales (Gramann et al., 2010; Debener et al., 2012; Severens et al., 2012). Asimismo, el desarrollo de nuevas tecnologías de electrodos aseguran que en el futuro cercano se podrá recolectar EEG desde sistemas portables, cómodos (Mathewson et al., 2017; Oliveira et al., 2016) e incluso invisibles (Bleichner et al., 2016; Debener et al., 2015; Mikkelsen et al., 2015; Mirkovic et al., 2016).

Magnetoencephalogram

Uno de los avances tecnológicos más interesantes del último tiempo es la posibilidad de medir campos electromagnéticos provenientes del cerebro de manera portátil. Hasta ahora MEG utiliza equipos de alto costo, sin la capacidad de moverse y que necesitan mucho espacio físico. Esto se debe a la tecnología de superconducción (conocidos como SQUID, *superconducting quantum interference device*), que requiere superenfriamiento (*supercooling*) mediante helio líquido (Ahonen et al., 1991). La nueva tecnología se conoce como magnetómetro bombeado ópticamente (OPM, *optically pumped magnetometers*) y son de menor costo que los SQUID dado que no necesitan superenfriamiento. Datos adquiridos con esta nueva tecnología indican que la calidad de los datos es comparable a la calidad obtenida con el MEG tradicional, incluso en la presencia de movimientos de cuello y cabeza (Boto et al., 2018). Sin embargo, existen importantes limitaciones al nuevo sistema, dentro de ellas la más importante es que los OPM sólo pueden funcionar en espacios que hayan sido debidamente aislados de otros campos

electromagnéticos (en especial el de la tierra). Esta limitante hace imposible su uso en el “mundo real”, dejando al MEG móvil inevitablemente dentro del laboratorio. Sin embargo, este avance tecnológico es importante dado que el MEG posee excelente resolución temporal y espacial, por lo que podría significar un potencial reemplazo del fMRI y su inevitable posición supina al momento de recolectar datos. Así, el MEG móvil se presenta como una opción para el estudio de la cognición en situaciones de mayor viabilidad ecológica, teniendo en cuenta preguntas de carácter estructural y funcional.

Dinámica Neurovascular Funcional Móvil

Basados en la premisa del acoplamiento neurovascular (Carmignoto & Gómez-Gonzalo, 2010), la medición de cambios específicos en concentración sanguínea deberían ser interpretables como cambios en la actividad metabólica del sistema nervioso. En la actualidad, el fMRI es uno de los métodos más utilizados para obtener imágenes estructurales y funcionales asociadas a los actos cognitivos. Sin embargo, este y otros sistemas basados en metabolismo/hemodinámica requieren que los participantes se ubiquen supinamente, lo que los aleja del requerimiento 4E. Asimismo, en contraste con la electrofisiología cognitiva, la hemodinámica funcional móvil ha logrado un nivel de desarrollo más bien modesto. A continuación revisaremos los avances más notables para cumplir la promesa de MoBI; la obtención de imágenes estructurales y funcionales del cerebro en condiciones ecológicamente válidas (Makeig et al., 2009).

Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)

El método más conocido para medición hemodinámica funcional es el fMRI (Bandettini et al., 1992).

En el mundo, durante los últimos 5 años, se ha visto un destacado interés en desarrollar un sistema de resonancia magnética portátil y de bajo costo. Algunos esfuerzos logran cierta portabilidad pero a un alto costo al utilizar la misma tecnología que MEG, superconductores SQUID (Espy et al., 2015). Otras aproximaciones logran cierta portabilidad y bajo costo al utilizar electromagnetos especialmente diseñados (Sarracanie et al., 2015). Estos sistemas se conocen como *ultra-low field MR* y por el momento los participantes se posicionan supinamente mientras se adquieren los datos. Por lo tanto la tecnología fMRI por diversas razones (e.g. en Chile, pocas instituciones cuentan con accesos a resonadores) aún se encuentra lejos de ser una innovación importante para el programa de trabajo en 4E.

Positron Emission Imaging (PET)

La Tomografía por Emisión de Positrones (PET) fue un método ampliamente utilizado en la década de 1980 para la obtención de contrastes funcionales basados en emisión radioactiva con alta resolución espacial (Cabeza & Nyberg, 1997). Debido a que los participantes deben someterse a una pequeña dosis de radiación para hacer los contrastes funcionales, este método es considerado de carácter invasivo y fue ampliamente reemplazado por el fMRI en los 90's. Sin embargo, la posibilidad de localizar ligandos convierte al PET en una herramienta de incomparable valor clínico, por lo que la invención de un sistema PET portátil y de baja dosis (conocido como *low-dose PET*) sería de gran utilidad científica y clínica. La primera invención

de este tipo es un sistema llamado RatCAP, que permite medir PET en ratas en movimiento (Schulz & Vaska, 2011). Basado en esta tecnología otros proyectos han tratado de adaptar su uso para humanos. Así, los prototipos de PET-Hat (Yamamoto et al., 2011) y PET portable (Yamaya et al., 2015). Sin embargo, ambos sistemas no son realmente portables dado el gran tamaño de sus sensores. Un prototipo más prometedor está basado en el uso de microdosis que reduce entre 75-90% la cantidad de radiación conocido como AM-PET, *ambulatory microdose PET* (Melroy et al., 2017). Este sistema es efectivamente portátil al ser más liviano y permitir movimientos restringidos. Sin embargo, al igual que PET-Hat y PET portable, AM-PET aún está en etapa de desarrollo.

Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS)

La técnica con mayor promesa para unirse a la caja de herramientas MoBI es fNIRS. Esta tecnología utiliza la proyección y reflexión de luz near-infrared para cuantificar cambios en la concentración de hemoglobina en la sangre. Los sensores fNIRS son pequeños y livianos por lo que se pueden utilizar en arreglos portátiles para medir actividad cortical durante movimiento (Miyai et al., 2001; Quaresima & Ferrari, 2019; Suzuki et al., 2008).

El mayor problema de fNIRS es compartido con todos los sistemas basados en dinámicas metabólicas/hemodinámicas: una baja resolución temporal en el orden de segundos (Irani et al., 2007). Debido a esta limitación estructural, los sistemas hemodinámicos deben ser utilizados para responder preguntas específicas. Asimismo, diseños experimentales que requieran movimientos o decisiones rápidas en fracciones de segundo no podrían ser explotados de la mejor manera con este tipo de tecnología.

Medición Conductual Móvil

La medición conductual móvil ha avanzado de manera importante en los últimos 20 años gracias al desarrollo de sensores digitales de alta resolución, portátiles y de bajo costo. En Chile, diversas instituciones tienen acceso a laboratorios de movimiento equipados con sistemas de captura de movimiento (MOCAP). La tecnología MOCAP se utiliza regularmente en contextos de investigación en rehabilitación en combinación, a veces, con realidad virtual (Holden, 2005). Asimismo, MoBI se ha beneficiado en gran medida de la tecnología MOCAP, sin embargo el posicionamiento de sensores y multiplicidad de cámaras requeridas, hace que MOCAP sea una herramienta de gran utilidad pero en contextos específicos de laboratorio (Gramann et al., 2010; Gwin et al., 2010). A continuación discutimos avances que consideran medición de dinámicas corporales y oculares que podrán ser utilizadas en ambientes de alta movilidad.

Grabaciones Audiovisuales

Sensores digitales de alta resolución y bajo costo pueden ser utilizados para generar sistemas que permiten adquirir múltiples ángulos de movimiento. Algunos de estos sensores pueden ser sistemas de consumo masivo como Wii remote (Attygalle et al., 2008) o cámaras de video digital (Sigal et al., 2009; Sundaresan & Chellappa, 2005). La adquisición de video permite, posteriormente, analizar las dinámicas de interacción entre participantes en contextos de relevancia. Avances en software permiten el análisis de movimiento utilizando sistemas de cámaras de grado de consumo, lo que hace la tecnología más accesible y fácil de implementar en contextos ecológicamente válidos. Un ejemplo de esto es el análisis de energía del movimiento (MEA, *motion energy analysis*) en contextos psicoterapéuticos (Ramseyer & Tschacher, 2011;

Tschacher et al., 2014). La psicoterapia en un contexto altamente ecológico donde un terapeuta se reúne con un paciente para desarrollar una relación profesional que conlleva interacciones de carácter terapéutico. En Chile, esta aproximación se ha utilizado para estudiar el proceso psicoterapéutico (Krause et al., 2007; Martínez, 2011) y en conjunto con EEG para explorar dinámicas cerebrales asociadas (Parada et al., 2018; Rodríguez et al., 2018).

Al usar sistemas audiovisuales, se pueden obtener datos acerca de los movimientos corporales y/o comunicación no-verbal, en conjunto con cualquier vocalización y -de existir- interacción verbal entre participantes. La percepción de la voz es una dimensión generalmente olvidada en ciencias cognitivas, pero que es de gran relevancia para entender la cognición en su estado natural (Campanella & Belin, 2007). En Chile, existe solo un estudio sobre el uso del estudio de la voz en el contexto de la psicoterapia (Tomicic et al., 2015).

EyeTracker

Las técnicas de seguimiento ocular ofrecen, de manera simple y por medios no invasivos una medida de acercamiento a fenómenos cognitivos y socio-afectivos de diversa índole. Debido a la facilidad de uso y su implementación relativamente simple, tanto la tecnología como las aplicaciones de eye-tracking han sido ampliamente desarrollados en la últimas décadas (Alemdag & Cagiltay, 2018; Duchowski, 2007; Kredel et al., 2017; Pieters & Wedel, 2017). Así, en los últimos 40 años, el uso de dispositivos de seguimiento ocular ha aumentado considerablemente. Investigaciones que usan medidas de seguimiento ocular buscan 1) proveer configuraciones experimentales ecológicamente válidas (e.g. Aryadoust & Ang, 2019; John et al., 2018; Kredel et al., 2017); 2) alta precisión junto con sensibilidad espacial y temporal en la medición. Asimismo, el desarrollo de tecnología móviles robustas que permiten la captura del

movimiento ocular mientras que los participantes interactúan de forma activa tanto en ambientes naturales como virtuales ha permitido empezar a plantearse preguntas de investigación que se acercan cada vez más a la agenda de trabajo 4E (Gramann et al., 2014; Jungnickel & Gramann, 2016; Makeig et al., 2009).

Debido a que esta tecnología está siendo cada vez más accesible, en Chile, son diversas las instituciones que cuentan con estos dispositivos, abriendo diversas líneas de investigación que van desde el marketing hasta las ciencias cognitivas básicas.

MoBI en Chile

En el contexto Chileno, debemos considerar que la investigación en Neurociencia Humana -con preguntas acerca de fenómenos de carácter social- se inició en la segunda mitad de década del 2000 tras la inauguración de los laboratorios de electrofisiología de la Facultad de Psicología de la Universidad Diego Portales en el 2006, la Universidad de La Frontera en el 2007 y otras. Estos laboratorios fueron diseñados desde el paradigma tradicional de las ciencias cognitivas y han marcado el diseño e implementación de múltiples otros laboratorios hasta la fecha. De a poco, esta realidad ha ido cambiando a medida que distintas instituciones, incluyendo la Universidad Diego Portales y la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso en 2016, la Universidad de Chile en 2017 o la Universidad de Concepción en 2018, han adquirido equipos de carácter móvil/portátil. Sin embargo, la compra de equipos no ha producido -aún- el establecimiento de programas de investigación de gran impacto a nivel nacional e internacional. Dentro de otras variables, la complejidad que significa llevar a cabo un programa de investigación basado en las 4E exitosamente a la práctica.

Habiendo actualizado al lector respecto de los principales avances tecnológicos que posibilitan a MoBI, procedemos a discutir los principales desafíos y oportunidades de su implementación. En particular cabe mencionar que los desafíos efectivamente impactan el desarrollo del programa de investigación 4E no sólo en Chile, sino globalmente.

Principales Desafíos y Oportunidades en la Implementación de un Programa de Investigación basado en MoBI+4E

El momento actual de desarrollo teórico y tecnológico posibilitan a los investigadores a explorar preguntas que podrían haber sido consideradas como ciencia ficción en el pasado reciente. Así, hoy en día se puede adquirir actividad conductual y fisiológica de uno o múltiples agentes en movimiento, de manera simultánea (Ladouce et al., 2017; Shamay-Tsoory & Mendelsohn, 2019). Sin embargo, estas tecnologías están lejos de ser fáciles de usar para el desarrollo de programas de investigación (*plug & play*). A continuación discutimos los requerimientos más relevantes que, a nuestro parecer, representan tanto desafíos como oportunidades al momento de obtener imágenes del sistema cerebro/cuerpo-en-el-mundo.

Requerimientos específicos de equipamiento (hardware) y programas computacionales (software) para la adquisición de señales móviles

Como fue revisado en las secciones anteriores, hoy en día existen diversos sistemas de medición cerebral móvil. Sin embargo, el EEG dado su bajo costo y portabilidad, ha adquirido un estatus de “dispositivo de consumo” y ha comenzado a ser utilizado en aplicaciones de recreación (Martišius & Damaševičius, 2016). A su vez, estos sistemas de bajo costo han sido

reutilizados para investigación (Badcock et al., 2013). La gran mayoría de sistemas de grado de consumidor funcionan bien en situaciones de alta relación señal-ruido (*signal-to-noise-ratio*, SNR), como por ejemplo, paradigmas de *event-related potentials* (ERP) (Badcock et al., 2013; Debener et al., 2012). Sin embargo, en situaciones de bajo SNR, muchos de estos sistemas no tienen el rendimiento esperado. Durante el año 2018 nuestro grupo de investigación adquirió movimientos oculares mediante EyeTracker y señales EEG mientras participantes realizaban una caminata de 600 metros en distintos barrios de Santiago, Chile (Palacios-Garcia et al., 2020; Parada et al., 2019). Utilizamos el sistema EnoBio con 8 sensores (Ruffini et al., 2007). Sin embargo, en estas condiciones de bajo SNR, las señales capturadas no pudieron ser utilizadas para responder las preguntas científicas que habíamos intencionado (Radüntz, 2018). En contraste, cuando una caminata similar se realiza utilizando un sistema de mayor costo, EEGO de ANTneuro, el EEG se obtuvo de manera más robusta. La FIGURA 2 muestra una comparación entre ambas señales, sugiriendo que efectivamente, en situaciones de bajo SNR, se recomienda utilizar una mayor cantidad de sensores (Gwin et al., 2010) y -posiblemente- sistemas de grado de investigación, no consumo, dada la diferencia en los materiales usados (Mathewson et al., 2017). Una conclusión que se puede sacar es que los sistemas móviles, con electrodos secos aún requieren algunos avances para lograr la calidad de señal requerida para investigación (Oliveira et al., 2016).

Otro factor a considerar es la sincronización de equipos. En laboratorios tradicionales este es un problema relativamente menor, dado que por lo general i) no se utilizan múltiples sistemas de medición simultáneos y ii) los sistemas usados son estáticos y se encuentran conectados mediante cables que -al ser implementados correctamente- aseguran su

sincronización. Sin embargo, MoBI requiere la menor cantidad de cables para asegurar movilidad. Hoy en día, la mejor forma de sincronizar diversas fuentes de datos es mediante LabStreamingLayer (LSL) (Kothe, 2019). Esta es la solución que hemos escogido para implementar nuestro sistema MoBI dual para estudiar interacción social en la Universidad Diego Portales. Si bien existen otras formas y posibilidades de sincronización, en nuestra experiencia, éstas resultan insatisfactorias y conducentes a errores de medición. Por lo tanto, si se desea adquirir múltiples fuentes de datos simultáneamente, la implementación de software de sincronización debe ser llevada a cabo de manera adecuada.

La implementación correcta de hardware/software evita adquirir datos que tengan baja o nula utilidad. Esta situación significa -en última instancia- una falta ética de parte de los investigadores respecto a su rol frente a los participantes y una malversación de los fondos que han sido destinados para el apoyo de esas investigaciones. Por lo tanto, el uso de sensores apropiados para el contexto de adquisición de datos y su correspondiente conectividad es primordial para una exitosa implementación de MoBI tanto a nivel técnico como ético. Es decir, los sistemas que serán utilizados en conjunto deben estar debidamente sincronizados mediante software/hardware especialmente diseñado para esa tarea.

Nuevos desarrollos de hardware y software presentan una especial oportunidad para mejorar las estrategias de diagnóstico y tratamiento de condiciones neuropsiquiátricas. Primero, estas tecnologías permitirán a las personas adquirir y manejar información sobre su estado de salud de forma no invasiva y de menor costo (Goverdovsky et al., 2017; Piwek et al., 2016). Estableciendo así un vínculo directo y continuo entre los profesionales de la salud y los usuarios de sus servicios. Cabe destacar que preguntas relacionadas tanto a la validez clínica como a las

implicancias éticas de estos sistemas *wearables* y/o *hearables* aún persiste (Sommaggio et al., 2004).

Requerimientos específicos de diseños experimentales y los espacios físicos que éstos requieren

En Chile, los laboratorios de neurociencia cognitiva fueron diseñados siguiendo la lógica de las ciencias cognitivas tradicionales (FIGURA 1), por lo que para implementar un programa de investigación en 4E, experimentos MoBI no sólo requieren nuevas hipótesis sino que también nuevos espacios (FIGURA 1). En 2018 nuestro grupo de investigación sugirió la idea de “experimentos escalables en su diseño” (EED) como un útil heurístico metodológico (Parada, 2018). Recientemente, ideas similares han sido propuestas por otros autores (Matusz et al., 2019; Shamay-Tsoory & Mendelsohn, 2019). El concepto central detrás de estas propuestas, es la integración de experimentos tradicionales (estructurado) con experimentos MoBI, donde los participantes se pueden mover libremente dentro de cierto contexto (estructurado/semi-estructurado) y situaciones del mundo real (semi-estructurado/no-estructurado). EED consideran -desde su concepción- la idea de escalabilidad de complejidad del fenómeno cognitivo a estudiar. Esta escalabilidad depende de que la hipótesis sea formulada de tal forma que permita generar un marcador fisiológico que pueda ser testeado tanto en condiciones de laboratorio tradicional como en experimentos MoBI y situaciones experimentales del mundo real. Así, todo EED tiene a la base 3 objetivos: i) probar hasta qué punto los fenómenos cognitivos gatillados en el laboratorio puedan ser “artefactos” (Bronfenbrenner, 1977), aportando directamente al desarrollo empírico de la aproximación 4E,

ii) replicar conocidos efectos en condiciones de mayor validez ecológica (Debener et al., 2012; De Vos et al., 2014; Soto et al., 2018) y iii) sistematizar la extensión de nuestros laboratorios hasta el mundo real (Parada, 2018; Parada & Rossi, 2017). Asimismo, EED tienen ventajas al incrementar la interpretabilidad de los resultados en condiciones de bajo SNR en el mundo real mediante la replicabilidad inherente.

Una verdadera innovación que provee la aproximación 4E y MoBI es la posibilidad de adquirir señales desde participantes de manera longitudinal en situaciones cotidianas (Rodríguez et al., 2018). Este tipo de datos no existe actualmente y representa una ventana a las dinámicas cerebrales en su estado natural. El desarrollo de hipótesis novedosas es de suma importancia para este tipo de dataset que se caracterizará por bajo SNR, virtualmente ilimitadas horas de grabación, múltiples fuentes de datos (e.g. EEG, eye-tracker, ECG, etc.) y alta heterogeneidad entre participantes. Por lo que la integración de datos referentes a los estilos de vida (e.g. actividades de la vida diaria) y/o experiencias (e.g. análisis de discurso) servirán para interpretar las señales adquiridas (Parada & Rossi, 2018).

La implementación experimental del programa de investigación 4E no sólo se ve dificultada por aspectos teóricos de diseño experimental, sino que también por la disposición física de los espacios que un setup experimental tradicional provee. Así, será necesaria la implementación de nuevos espacios para los laboratorios y/o la flexibilización de los espacios de adquisición de datos actual. Esto representa un reto no menor en términos económicos y estratégicos tanto para los investigadores como para las instituciones académicas y de investigación en Chile y el mundo.

Requerimientos específicos de equipamiento (hardware) y programas computacionales (software) para el análisis de señales móviles

Adquirir datos MoBI en contextos semi-estructurados y no-estructurados representa un reto tanto a nivel de hardware como software. Asimismo, la visualización y análisis de éstos puede llegar a ser de incluso mayor complicación. En estos casos, la expresión informática “garbage in, garbage out” es más verdadera que nunca, especialmente si consideramos que SNR se ve disminuido en contextos de mayor movimiento (Gwin et al., 2010) y depende directamente de la calidad de los sistemas utilizados (Radüntz, 2018). Así, investigadores trabajando en el paradigma 4E deberán recurrir a mejoras de hardware (Nordin et al., 2018; Radüntz, 2018), utilización de algoritmos computacionales (Gwin et al., 2010) e implementar EED (Parada, 2018). Los mayores avances se han alcanzado por iniciativas de software open-source como MOBILAB (Ojeda et al., 2014) para poder visualizar y analizar datos MoBI. Dada la gran heterogeneidad de diseños y fuentes de datos, es importante recalcar que la comunidad MoBI carece de estándares o acuerdos acerca de cómo analizar y/o visualizar datos. Sin embargo, hoy en día, a 90 años de la invención del EEG (Berger, 1929) aún existen dificultades para estandarizar el análisis y la interpretación de señales obtenidas en condiciones tradicionales (Cohen & Gulbinaite, 2014).

Conclusión

En los últimos años, ha sido posible evidenciar el avance de las ciencias cognitivas en el entendimiento del operar del sistema nervioso, sobre todo en la identificación de los diversos

sistemas cognitivos y neurales que subyacen su funcionamiento. Para alcanzar dicho objetivo, los experimentos de laboratorios han sido de gran relevancia en la medida que han permitido establecer relaciones entre las distintas dinámicas cerebrales implicadas en el fenómeno cognitivo, siendo el progresivo desarrollo tecnológico clave para la obtención de datos. Empero, a pesar de su relevancia y validez en cuanto al control de las diversas variables y la fiabilidad de los datos obtenidos, los diseños experimentales utilizados tienden a carecer de validez ecológica, por lo tanto no es posible estudiar la cognición como resultado de la experiencia real vivida, dejando de lado las dinámicas propias del sistema cerebro/cuerpo en el mundo. De esta manera, la utilización de las diversas tecnologías para el estudio bajo el paradigma que propone MoBI podría entenderse como una posible solución a este problema, en tanto permitiría llevar la realización de investigación experimental controlada fuera del laboratorio. Sin embargo, esta nueva aproximación epistémico/metodológica no está exenta de desafíos, desde la necesidad de contar con mayores desarrollos tecnológicos en cuanto a equipos (hardware) para lograr una mayor portabilidades y robustez al momento de adquirir señales, como también mayores desarrollos a nivel de software para lograr realizar análisis de datos que integren las diversas señales provenientes del sistema cerebro/cuerpo en el mundo, y la implementación de diseños experimentales con mayor validez ecológica, lo que requiere de la modificación de los espacios físicos en los cuales se desarrollan las investigaciones, adecuándose a los nuevos diseños experimentales. Asimismo, la presencia de estos desafíos implican nuevas oportunidades, a saber, la posibilidad para la identificación y el diagnóstico de enfermedades neuropsiquiátricas de una forma no invasiva y con costo reducido y la posibilidad de adquirir diversas señales de los participantes en situaciones cotidianas, permitiendo ampliar el enfoque de las hipótesis

planteadas. Es por esto que nos encontramos en un momento clave para el trabajo y la articulación de la comunidad MoBI con miras a resolver los desafíos que se plantean y avanzar hacia un desarrollo experimental de las ciencias cognitivas con mayor validez ecológica que posibilite el entendimiento de las diversas dinámicas implicadas en la cognición, evitando reducirlas al estudio de lo intracerebral, e incorporando el cuerpo y el entorno en el cual se genera.

Figuras

Figura 1

Figure 2

Referencias

- Adams, F., & Aizawa, K. (2001). The bounds of cognition. *Philosophical Psychology*, 14(1), 43–64. <https://doi.org/10.1080/09515080120033571>
- Ahonen, A. I., Hamalainen, M. S., Kajola, M. J., Knuutila, J. E. T., Lounasmaa, O. V., Simola, J. T., Tesche, C. D., & Vilkmann, V. A. (1991). Multichannel SQUID systems for brain research. *IEEE Transactions on Magnetics*, 27(2), 2786–2792. <https://doi.org/10.1109/20.133789>
- Alemdag, E., & Cagiltay, K. (2018). A systematic review of eye tracking research on multimedia learning. *Computers & Education*, 125, 413–428. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.06.023>
- Aryadoust, V., & Ang, B. H. (2019). Exploring the frontiers of eye tracking research in language studies: a novel co-citation scientometric review. *Computer Assisted Language Learning*, 1–36. <https://doi.org/10.1080/09588221.2019.1647251>
- Attygalle, S., Duff, M., Rikakis, T., & Jiping He. (2008). Low-cost, at-home assessment system with Wii Remote based motion capture. *2008 Virtual Rehabilitation*, 168–174. <https://doi.org/10.1109/ICVR.2008.4625155>
- Badcock, N. A., Mousikou, P., Mahajan, Y., de Lissa, P., Thie, J., & McArthur, G. (2013). Validation of the Emotiv EPOC®EEG gaming system for measuring research quality auditory ERPs. *PeerJ*, 1, e38. <https://doi.org/10.7717/peerj.38>
- Bandettini, P. A., Wong, E. C., Hinks, R. S., Tikofsky, R. S., & Hyde, J. S. (1992). Time course EPI of human brain function during task activation. *Magnetic Resonance in Medicine: Official Journal of the Society of Magnetic Resonance in Medicine / Society of Magnetic Resonance in Medicine*, 25(2), 390–397. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1614324>

- Berger, H. (1929). Electroencephalogram in humans. *Archiv Fur Psychiatrie Und Nervenkrankheiten*, 87, 527–570.
- Berthoz, A. (2008). *Neurobiology of “Umwelt”: How Living Beings Perceive the World*. Springer Science & Business Media. <https://play.google.com/store/books/details?id=Jht5zCV--KQC>
- Bhattacharya, R. (2002). Cārvāka fragments: a new collection. *Journal of Indian Philosophy*. <http://www.springerlink.com/index/MX16K32012766M21.pdf>
- Bleichner, M. G., Mirkovic, B., & Debener, S. (2016). Identifying auditory attention with ear-EEG: cEEGrid versus high-density cap-EEG comparison. *Journal of Neural Engineering*, 13(6), 066004. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/13/6/066004>
- Boto, E., Holmes, N., Leggett, J., Roberts, G., Shah, V., Meyer, S. S., Muñoz, L. D., Mullinger, K. J., Tierney, T. M., Bestmann, S., Barnes, G. R., Bowtell, R., & Brookes, M. J. (2018). Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system. *Nature*, 555(7698), 657–661. <https://doi.org/10.1038/nature26147>
- Bronfenbrenner, U. (1977). Toward an experimental ecology of human development. *The American Psychologist*, 32(7), 513–531. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.32.7.513>
- Brunswik, E. (1943). Organismic achievement and environmental probability. *Psychological Review*, 50(3), 255. <https://psycnet.apa.org/record/1943-02543-001>
- Bunge, M. (2014). *The Mind–Body Problem: A Psychobiological Approach*. Elsevier. <https://play.google.com/store/books/details?id=AnKoBQAAQBAJ>
- Cabeza, R., & Nyberg, L. (1997). Imaging Cognition: An Empirical Review of PET Studies with Normal Subjects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9(1), 1–26. <https://doi.org/10.1162/jocn.1997.9.1.1>
- Campanella, S., & Belin, P. (2007). Integrating face and voice in person perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(12), 535–543. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.10.001>

- Carmignoto, G., & Gómez-Gonzalo, M. (2010). The contribution of astrocyte signalling to neurovascular coupling. *Brain Research Reviews*, 63(1-2), 138–148.
<https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2009.11.007>
- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2012). Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(1), 1–23. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0182-x>
- Clark, A., & Chalmers, D. (1998). The Extended Mind. *Analysis*, 58(1), 7–19.
<https://doi.org/10.1093/analys/58.1.7>
- Cohen, M. X., & Gulbinaite, R. (2014). Five methodological challenges in cognitive electrophysiology. *NeuroImage*, 85, 702–710.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.08.010>
- Craver, C. F. (2007). *Explaining the Brain: Mechanisms and the Mosaic Unity of Neuroscience*. Clarendon Press. <https://play.google.com/store/books/details?id=16IVDAAAQBAJ>
- Debener, S., Emkes, R., De Vos, M., & Bleichner, M. (2015). Unobtrusive ambulatory EEG using a smartphone and flexible printed electrodes around the ear. *Scientific Reports*, 5, 16743.
<https://doi.org/10.1038/srep16743>
- Debener, S., Minow, F., Emkes, R., Gandras, K., & de Vos, M. (2012). How about taking a low-cost, small, and wireless EEG for a walk?: EEG to go. *Psychophysiology*, 49(11), 1617–1621. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2012.01471.x>
- De Jaegher, H., Di Paolo, E., & Gallagher, S. (2010). Can social interaction constitute social cognition? *Trends in Cognitive Sciences*, 14(10), 441–447.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.06.009>
- De Vos, M., Gandras, K., & Debener, S. (2014). Towards a truly mobile auditory brain–computer interface: Exploring the P300 to take away. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 91(1), 46–53.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.08.010>

Duchowski, A. T. (2007). Eye tracking methodology. *Advances in Health Sciences Education: Theory and Practice*, 328(614), 2–3.

<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-57883-5.pdf>

Espy, M. A., Magnelind, P. E., Matlashov, A. N., Newman, S. G., Sandin, H. J., Schultz, L. J., Sedillo, R., Urbaitis, A. V., & Volegov, P. L. (2015). Progress Toward a Deployable SQUID-Based Ultra-Low Field MRI System for Anatomical Imaging. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(3), 1–5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2365473>

Feyerabend, P. (1970). Materialism and the mind—body problem. In C. V. Borst (Ed.), *The Mind-Brain Identity Theory: A Collection of Papers Compiled Edited and Furnished with an Introduction by* (pp. 142–156). Macmillan Education UK.

https://doi.org/10.1007/978-1-349-15364-0_15

Flor, N. V., & Hutchins, E. L. (1991). A case study of team programming during perfective software maintenance. *Empirical Studies of Programmers: Fourth Workshop*, 36. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=KT_bpSSJBgcC&oi=fnd&pg=PA36&dq=Flor+und+Hutchins+1991+Analyzing+Distributed+Cognition+in+Software+Teams:+a+Case+Study+of+Collaborative+Programming+During+Adaptive+Software+Maintenance&ots=xQpweSnAIC&sig=riDpNSzSD-hWkr8TpuBMW8jblek

Gardner, H. (1987). *The mind's new science: A history of the cognitive revolution*. Basic books.

Gibson, J. J. (2014). *The ecological approach to visual perception: classic edition*. Psychology Press.

<https://content.taylorfrancis.com/books/download?dac=C2013-0-26227-3&isbn=9781317579380&format=googlePreviewPdf>

Goodale, M. A., Milner, A. D., Jakobson, L. S., & Carey, D. P. (1991). A neurological dissociation

- between perceiving objects and grasping them. *Nature*, 349(6305), 154–156.
<https://doi.org/10.1038/349154a0>
- Goverdovsky, V., von Rosenberg, W., Nakamura, T., Looney, D., Sharp, D. J., Papavassiliou, C., Morrell, M. J., & Mandic, D. P. (2017). Hearables: Multimodal physiological in-ear sensing. *Scientific Reports*, 7(1), 6948. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06925-2>
- Gramann, K., Ferris, D. P., Gwin, J., & Makeig, S. (2014). Imaging natural cognition in action. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 91(1), 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.09.003>
- Gramann, K., Gwin, J. T., Bigdely-Shamlo, N., Ferris, D. P., & Makeig, S. (2010). Visual evoked responses during standing and walking. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4, 202.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00202>
- Gwin, J. T., Gramann, K., Makeig, S., & Ferris, D. P. (2010). Removal of Movement Artifact From High-Density EEG Recorded During Walking and Running. *Journal of Neurophysiology*, 103(6), 3526–3534. <https://doi.org/10.1152/jn.00105.2010>
- Hampton, R. R., Hampstead, B. M., & Murray, E. A. (2004). Selective hippocampal damage in rhesus monkeys impairs spatial memory in an open-field test. *Hippocampus*, 14(7), 808–818. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hipo.10217>
- Holden, M. K. (2005). Virtual environments for motor rehabilitation. *Cyberpsychology & Behavior: The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*. <https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/cpb.2005.8.187>
- Hutchins, E. (1995). *Cognition in the Wild*. MIT Press.
<https://play.google.com/store/books/details?id=CGIaNc3F1MgC>
- Irani, F., Platek, S. M., Bunce, S., Ruocco, A. C., & Chute, D. (2007). Functional near infrared spectroscopy (fNIRS): an emerging neuroimaging technology with important applications for

- the study of brain disorders. *The Clinical Neuropsychologist*, 21(1), 9–37.
<https://doi.org/10.1080/13854040600910018>
- John, K. K., Jensen, J. D., King, A. J., Pokharel, M., & Grossman, D. (2018). Emerging applications of eye-tracking technology in dermatology. *Journal of Dermatological Science*.
<https://doi.org/10.1016/j.jdermsci.2018.04.002>
- Jungnickel, E., & Gramann, K. (2016). Mobile Brain/Body Imaging (MoBI) of Physical Interaction with Dynamically Moving Objects. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 306.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00306>
- Kothe, C. (2019). Lab streaming layer (LSL). <https://github.com/sccn/labstreaminglayer>.
Accessed on August, 26, 2015.
- Krause, M., la Parra, G. de, Arístegui, R., Dagnino, P., Tomicic, A., Valdés, N., Echávarri, O., Strasser, K., Reyes, L., Altimir, C., Ramírez, I., Vilches, O., & Ben-Dov, P. (2007). The evolution of therapeutic change studied through generic change indicators. *Psychotherapy Research: Journal of the Society for Psychotherapy Research*, 17(6), 673–689.
<https://doi.org/10.1080/10503300601158814>
- Kredel, R., Vater, C., Klostermann, A., & Hossner, E.-J. (2017). Eye-Tracking Technology and the Dynamics of Natural Gaze Behavior in Sports: A Systematic Review of 40 Years of Research. *Frontiers in Psychology*, 8, 1845. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01845>
- Ladouce, S., Donaldson, D. I., Dudchenko, P. A., & Letswaart, M. (2017). Understanding Minds in Real-World Environments: Toward a Mobile Cognition Approach. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00694>
- Leuridan, B. (2012). Three Problems for the Mutual Manipulability Account of Constitutive Relevance in Mechanisms. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 63(2), 399–427. <https://doi.org/10.1093/bjps/axr036>

- Maimon, G., Straw, A. D., & Dickinson, M. H. (2010). Active flight increases the gain of visual motion processing in *Drosophila*. *Nature Neuroscience*, 13(3), 393–399.
<https://doi.org/10.1038/nn.2492>
- Makeig, S., Gramann, K., Jung, T.-P., Sejnowski, T. J., & Poizner, H. (2009). Linking brain mind and behavior. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 73(2), 95–100.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2008.11.008>
- Malkova, L., & Mishkin, M. (2003). One-trial memory for object-place associations after separate lesions of hippocampus and posterior parahippocampal region in the monkey. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 23(5), 1956–1965.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12629201>
- Martínez, C. (2011). *Regulación mutua y Dialogicidad en Psicoterapia: Un Análisis Empírico de la Subjetividad e Intersubjetividad En el Discurso Terapéutico [Mutual Regulation and Dialogue in Psychotherapy: An Empirical Analysis of Subjectivity and Intersubjectivity in Thetherapeutic Discourse]*. Saarbrücken: EAE Publishing.
- Martišius, I., & Damaševičius, R. (2016). A Prototype SSVEP Based Real Time BCI Gaming System. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016, 3861425.
<https://doi.org/10.1155/2016/3861425>
- Mathewson, K. E., Harrison, T. J. L., & Kizuk, S. A. D. (2017). High and dry? Comparing active dry EEG electrodes to active and passive wet electrodes. *Psychophysiology*, 54(1), 74–82.
<https://doi.org/10.1111/psyp.12536>
- Matusz, P. J., Dikker, S., Huth, A. G., & Perrodin, C. (2019). Are We Ready for Real-world Neuroscience? *Journal of Cognitive Neuroscience*, 31(3), 327–338.
https://doi.org/10.1162/jocn_e_01276

- Melroy, S., Bauer, C., McHugh, M., Carden, G., Stolin, A., Majewski, S., Brefczynski-Lewis, J., & Wuest, T. (2017). Development and Design of Next-Generation Head-Mounted Ambulatory Microdose Positron-Emission Tomography (AM-PET) System. *Sensors*, 17(5).
<https://doi.org/10.3390/s17051164>
- Menary, R. (2010). Introduction to the special issue on 4E cognition. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, 9(4), 459–463. <https://doi.org/10.1007/s11097-010-9187-6>
- Merleau-Ponty, M. (1976). *Phénoménologie de la perception* (1945). *Librairie Gallimard, Paris*.
http://perso.lcpc.fr/roland.bremond/documents/MerleauPonty_intro.pdf
- Mikkelsen, K. B., Kappel, S. L., Mandic, D. P., & Kidmose, P. (2015). EEG Recorded from the Ear: Characterizing the Ear-EEG Method. *Frontiers in Neuroscience*, 9, 438.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2015.00438>
- Mirkovic, B., Bleichner, M. G., De Vos, M., & Debener, S. (2016). Target Speaker Detection with Concealed EEG Around the Ear. *Frontiers in Neuroscience*, 10, 349.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00349>
- Miyai, I., Tanabe, H. C., Sase, I., Eda, H., Oda, I., Konishi, I., Tsunazawa, Y., Suzuki, T., Yanagida, T., & Kubota, K. (2001). Cortical mapping of gait in humans: a near-infrared spectroscopic topography study. *NeuroImage*, 14(5), 1186–1192.
<https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0905>
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality: Principles and implications of cognitive psychology*. 230. <https://psycnet.apa.org/fulltext/2003-00066-000.pdf>
- Newen, A., De Bruin, L., & Gallagher, S. (Eds.). (2018). *The Oxford handbook of 4E cognition*. Oxford University Press.
- Nordin, A. D., Hairston, W. D., & Ferris, D. P. (2018). Dual-electrode motion artifact cancellation for mobile electroencephalography. *Journal of Neural Engineering*, 15(5), 056024.

<https://doi.org/10.1088/1741-2552/aad7d7>

Nunez, P. L., & Srinivasan, R. (2006). *Electric Fields of the Brain: The Neurophysics of EEG*. Oxford University Press.

Ojeda, A., Bigdely-Shamlo, N., & Makeig, S. (2014). MoBILAB: an open source toolbox for analysis and visualization of mobile brain/body imaging data. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 121. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00121>

Oliveira, A. S., Schlink, B. R., Hairston, W. D., König, P., & Ferris, D. P. (2016). Proposing Metrics for Benchmarking Novel EEG Technologies Towards Real-World Measurements. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 188. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00188>

Palacios-Garcia, I., Luarte, N., Herrmann-Lunecke, M.-G., Grasso-Cladera, A., & Parada, F. J. (2020). Environmental noise is differently associated with negative and positive urban experience: an exploratory first-person pedestrian mobile study in Santiago de Chile (El ruido medioambiental se asocia de una manera diferente a la experiencia urbana negativa y positiva: un estudio exploratorio en movimiento de peatones en primera persona realizado en Santiago de Chile). *Studies in Psychology*, 1–32. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02109395.2020.1795376?casa_token=umg4zvsnpkAAAAA:r2Ov_jWtqZaDZOxocEQUI-IJcKJn1qLe59PdZFe1tvpdn-ehURtbTQ2fNCYj-AQoSBqRcJKBMqb

Parada, F. J. (2018). Understanding Natural Cognition in Everyday Settings: 3 Pressing Challenges. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00386>

Parada, F. J., Martín, D. S., Tomicic, A., Rodriguez, E., & Martinez, C. (2018). Towards Obtaining Longitudinal Brain/Body Functional Connectivity in Semi-Structured Natural Interaction Settings: A Preliminary Analysis. In K. Gramann (Ed.), *Conference Proceedings*

of the 3rd International Mobile Brain/Body Imaging Conference (pp. 84–85). Technische Universität Berlin.

Parada, F. J., Palacios-García, I., Luarte, N., Herrmann, G., Vejares, P., Monsalve, S., & Mora, R. (2019). Experiencia y Carga Perceptual en Primera Persona al Caminar por Santiago. *Psykhē*, 28(5), 1–1.

Parada, F. J., & Rossi, A. (2017). Commentary: Brain-to-Brain Synchrony Tracks Real-World Dynamic Group Interactions in the Classroom and Cognitive Neuroscience: Synchronizing Brains in the Classroom. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00554>

Parada, F. J., & Rossi, A. (2018). If Neuroscience Needs Behavior What Does Psychology Need? *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00433>

Pieters, R., & Wedel, M. (2017). A review of eye-tracking research in marketing. *Review of Marketing Research*.
<https://content.taylorfrancis.com/books/e/download?dac=C2017-0-65435-0&isbn=9781351550932&doi=10.4324/9781351550932-13&format=pdf>

Piwek, L., Ellis, D. A., Andrews, S., & Joinson, A. (2016). The Rise of Consumer Health Wearables: Promises and Barriers. *PLoS Medicine*, 13(2), e1001953.
<https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001953>

Plato. (1911). *Plato's Phaedo*. Oxford : Clarendon press, 1911.
<https://search.library.wisc.edu/catalog/999866668102121>

Quaresima, V., & Ferrari, M. (2019). Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) for Assessing Cerebral Cortex Function During Human Behavior in Natural/Social Situations: A Concise Review. *Organizational Research Methods*, 22(1), 46–68.
<https://doi.org/10.1177/1094428116658959>

- Radüntz, T. (2018). Signal Quality Evaluation of Emerging EEG Devices. *Frontiers in Physiology*, 9, 98. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00098>
- Ramseyer, F., & Tschacher, W. (2011). Nonverbal synchrony in psychotherapy: coordinated body movement reflects relationship quality and outcome. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 79, 284–295.
- Rodríguez, E., Martínez, C., Díaz, M., Flores, J., Alvarez-Ruf, J., Crempien, C., Valdés, C., Campos, G., Artigas, C., Armijo, I., Krause, M., & Tomicic, A. (2018). Neurodynamics inside therapeutic interaction: a case study with simultaneous EEG recording / La neurodinámica en el contexto de la interacción terapéutica: un estudio de caso con una grabación simultánea de EEG. *Estudios de Psicología*, 39(1), 179–204. <https://doi.org/10.1080/02109395.2017.1407902>
- Rossi, A., Grasso-Cladera, A., Luarte, N., Riillo, A., & Parada, F. J. (2019). El Sistema Cerebro/Cuerpo-en-el-Mundo es el Objeto de Estudio de la Ciencia Cognitiva en el Siglo XXI. *Estudios de Psicología*. <https://doi.org/10.1080/02109395.2019.1596704>
- Ruffini, G., Dunne, S., Farres, E., Cester, I., Watts, P. C. P., Silva, S. P., Grau, C., Fuentemilla, L., Marco-Pallares, J., & Vandecasteele, B. (2007). ENOBIO dry electrophysiology electrode; first human trial plus wireless electrode system. *Conference Proceedings: ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference, 2007*, 6690–6694. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4353895>
- Sarracanie, M., LaPierre, C. D., Salameh, N., Waddington, D. E. J., Witzel, T., & Rosen, M. S. (2015). Low-Cost High-Performance MRI. *Scientific Reports*, 5, 15177. <https://doi.org/10.1038/srep15177>
- Schulz, D., & Vaska, P. (2011). Integrating PET with behavioral neuroscience using RatCAP

tomography. *Reviews in the Neurosciences*, 22(6), 647–655.

<https://doi.org/10.1515/RNS.2011.052>

Shamay-Tsoory, S. G., & Mendelsohn, A. (2019). Real-Life Neuroscience: An Ecological Approach to Brain and Behavior Research. *Perspectives on Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science*, 1745691619856350.

<https://doi.org/10.1177/1745691619856350>

Sigal, L., Balan, A. O., & Black, M. J. (2009). HumanEva: Synchronized Video and Motion Capture Dataset and Baseline Algorithm for Evaluation of Articulated Human Motion. *International Journal of Computer Vision*, 87(1), 4.

<https://doi.org/10.1007/s11263-009-0273-6>

Sinnamon, H. M. (2006). Decline in hippocampal theta activity during cessation of locomotor approach sequences: amplitude leads frequency and relates to instrumental behavior. *Neuroscience*, 140(3), 779–790. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2006.02.058>

Sommaggio, P., Mazzocca, M., Gerola, A., & Ferro, F. (2004). Cognitive liberty. A first step towards a human neuro-rights declaration. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1013(1), 221–228.

https://www.research.unipd.it/bitstream/11577/3266203/1/Cognitive_liberty._A_first_step_towards.pdf

Soto, V., Tyson-Carr, J., Kokmotou, K., Roberts, H., Cook, S., Fallon, N., Giesbrecht, T., & Stancak, A. (2018). Brain Responses to Emotional Faces in Natural Settings: A Wireless Mobile EEG Recording Study. *Frontiers in Psychology*, 9, 2003.

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02003>

Sundaresan, A., & Chellappa, R. (2005). Markerless Motion Capture using Multiple Cameras. *Computer Vision for Interactive and Intelligent Environment (CVIIIE'05)*, 15–26.

<https://doi.org/10.1109/CVIE.2005.13>

- Suzuki, M., Miyai, I., Ono, T., & Kubota, K. (2008). Activities in the frontal cortex and gait performance are modulated by preparation. An fNIRS study. *NeuroImage*, 39(2), 600–607. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.08.044>
- Tomicic, A., Martínez, C., Pérez, J. C., Hollenstein, T., Angulo, S., Gerstmann, A., Barroux, I., & Krause, M. (2015). Discourse-voice regulatory strategies in the psychotherapeutic interaction: a state-space dynamics analysis. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00378>
- Tschacher, W., Rees, G. M., & Ramseyer, F. (2014). Nonverbal synchrony and affect in dyadic interactions. *Frontiers in Psychology*, 5, 1323. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01323>
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. MIT Press. <https://market.android.com/details?id=book-gzLaDQAAQBAJ>
- Wiese, W., & Metzinger, T. (2017). Vanilla PP for Philosophers: A Primer on Predictive Processing. In T. Metzinger & W. Wiese (Eds.), *Philosophy and Predictive Processing*. philpapers.org. <https://philpapers.org/rec/WIEVPF>
- Yamamoto, S., Honda, M., Oohashi, T., Shimizu, K., & Senda, M. (2011). Development of a Brain PET System, PET-Hat: A Wearable PET System for Brain Research. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 58(3), 668–673. <https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2105502>
- Yamaya, T., Yoshida, E., Tashima, H., Inadama, N., Shinaji, T., Wakizaka, H., Nitta, M., Tazawa, S., Suhara, T., & Fujibayashi, Y. (2015). First prototype of a compact helmet-chin PET for high-sensitivity brain imaging. *Journal of Nuclear Medicine: Official Publication, Society of Nuclear Medicine*, 56(supplement 3), 317–317.

http://jnm.snmjournals.org/content/56/supplement_3/317.abstract