

## **MODELOS DE EXPLICACIÓN MECANICISTAS Y DINAMICISTAS: HACIA UNA POSIBLE COMPLEMENTARIEDAD DE LOS MODELOS A PARTIR DEL “CONECTOMA”**

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se aborda el debate que se ha establecido entre defensores del mecanicismo y dinamismo a la luz del análisis de nueva evidencia empírica sobre el “conectoma”, es decir, evidencia acerca de cómo se conectan y organizan las diferentes redes neuronales en el cerebro.

Se pretende señalar los alcances y límites de los modelos de explicación mencionados, y se propone una complementariedad, más que una sustitución, entre estos modelos que permita dar cuenta tanto del carácter altamente dinámico de los procesos cerebrales como de la organización de grandes cantidades de neuronas conectadas y de los niveles celulares y moleculares.

**Palabras claves:** Mecanicismo – Dinamicismo – Conectoma – Capacidades psicológicas.

### **INTRODUCCIÓN**

Qué modelo es adecuado para capturar el tipo de explicaciones que se establecen al relacionar capacidades psicológicas y actividades cerebrales es una cuestión que ha sido fuertemente debatida en los últimos tiempos. Este tema es de particular relevancia si se considera que este tipo de explicaciones ha sido cada vez más frecuente a partir de la disponibilidad de herramientas de neuroimagen, estudios sobre redes neuronales complejas y técnicas de simulación computacional.

En décadas anteriores había prevalecido en psicología un tipo de explicación funcionalista que no incluía de forma directa niveles de explicación basados en estructuras y actividades del cerebro. Este modelo, que se vio favorecido especialmente a partir de la década del 60' por el importante desarrollo cibernético, y a su vez el modelo software/hardware permitió que pudieran estudiarse las capacidades psicológicas de forma abstracta independiente, focalizando la explicación de capacidades a través de descomposición en subcapacidades y por la determinación de su organización, prescindiéndose en un grado importante de las estructuras, actividades y restricciones del cerebro. Sólo posteriormente el paso de modelos simbólicos basados en reglas a modelos conexionistas privilegió un modo de procesamiento de

información más parecido al cerebro. Sin embargo, estas explicaciones únicamente tomaron algunas ideas muy abstractas acerca del cerebro, el cual era reconstruido en un modelo general a partir del cual luego se generaban diferentes modelos computacionales. Es decir, el cerebro imponía restricciones muy abstractas y se continuaban dejando de lado detalles estructurales que más adelante se vio podían tener relevancia.

Algunos hitos recientes, tales como la posibilidad de estudiar procesos cerebrales humanos *in vivo* a partir del desarrollo de herramientas de neuroimagen (principalmente a partir de los años 90'), y la identificación de algunos mecanismos moleculares precisos involucrados en funciones complejas tales como la consolidación de la memoria, han alentado la idea de que las capacidades psicológicas podrían ser explicadas de forma más completa si se las relaciona con explicaciones acerca de los componentes neurobiológicos subyacentes, sus actividades y organización (Craver y Piccinini, 2011). En este sentido, la información concreta sobre las estructuras y actividades del cerebro en que las operaciones/funciones son llevadas a cabo constriñen las descripciones funcionales plausibles, y permiten establecer mejores explicaciones con un mayor nivel de ajuste a la realidad (Bechtel, 2007; Looren de Jong, 2002).

A partir de estas prácticas científicas, en el marco de la filosofía de la ciencia, se han propuesto diferentes modelos de explicación a que han variado en cuanto a su consideración respecto a cuán reductivas serían las relaciones establecidas. Mientras algunos han destacado las explicaciones en niveles inferiores, teniendo las explicaciones psicológicas sólo un rol heurístico (Bickle, 2003), otros han enfatizado la búsqueda de mecanismos por parte de los investigadores para dar cuenta de los fenómenos cognitivos en estudio, agrupando dichas explicaciones diferentes niveles (Bechtel, 2008; Craver, 2007). El modelo que recoge este último tipo de práctica es lo que ha dado en llamarse modelo de explicación mecanicista.

El modelo “mecanicista”, había sido propuesto anteriormente en biología, neurociencias, y sólo recientemente se popularizó como el modo más adecuado para dar cuenta de las explicaciones de capacidades psicológicas y su relación a los mecanismos cerebrales (Bechtel & Richardson, 2010; Bechtel, 2008; Piccinini & Craver, 2011; Wright & Bechtel, 2007). Este modelo se mostró adecuado para dar cuenta de las explicaciones sobre mecanismos neurales/moleculares implicados en capacidades psicológicas como la memoria por ejemplo. En este caso la capacidad de la memoria se relaciona al mecanismo molecular de potenciación a largo plazo, el cual involucra una intensificación duradera en la transmisión de señales. Esta intensificación de sinapsis que se da entre dos neuronas se explica apelando a: (1) algunos *componentes moleculares* involucrados en la estimulación sincrónica de estas dos neuronas

(iones de calcio, glutamato, moléculas de sodio y proteínas); (2) algunas *actividades* de esos componentes, como las de efectuar como canales receptores (AMPA y NMDA); (3) *propiedades organizacionales*, como ser el hecho de que en las sucesivas sinapsis generan aún más receptores, lo cual incrementa la capacidad excitatoria de la neurona (para una explicación detallada véase Craver, 2007, p.69-78).

Sin embargo, los alcances del modelo mecanicista fueron seriamente cuestionados cuando pretenden abordarse capacidades psicológicas más complejas, que involucran un relaciones de constante interacción del agente con el medio, o redes neuronales extensas, flexibles, en donde los “componentes” varían de forma constante (Zednik, 2012). Abordar estas capacidades más complejas en sistemas nerviosos cuya cantidad de neuronas y conexiones es muy grande (20000 en la aplysia a 75.000.000 en el ratón) ha requerido otras estrategias investigativas respecto a las que el modelo mecanicista puede mostrarse limitado, resultando más adecuados modelos dinámicos que contemplen estas particularidades.

El objetivo del presente trabajo consistirá en analizar en qué medida el modelo de mecanicista se muestra adecuado para capturar el tipo de explicaciones establecidas más allá del nivel de neuronas individuales. Concretamente analizaremos alguna evidencia empírica reciente sobre conectividad cerebral, que si bien muestra que la extensión y complejidad de las redes puede hacerse ahora más accesible<sup>1</sup> (lo cual brinda algún apoyo al modelo mecanicista), a su vez, se presentan como altamente variables, sensibles a los cambios ambientales y dinámicas (lo cual sustenta la importancia de modelos dinámicos de explicación). En este marco abordaremos la discusión acerca de qué modelo (mecanicista o dinámico) resulta adecuado para capturar el tipo de explicaciones que se establecen al relacionar capacidades psicológicas y actividades cerebrales.

A estos fines, presentaremos en la primera parte algunas características del modelo mecanicista, discutiremos algunos de los límites que se han señalado respecto a dicho modelo, así como las virtudes aparentemente superadoras de los modelos dinámicos. En la segunda parte presentaremos algunas evidencias recientes sobre lo que ha dado en llamarse “conectoma”, a partir de lo cual analizaremos qué modelo permite capturar mejor las características de las explicaciones que se están brindando acerca de la conectividad neural, y su relación a las capacidades psicológicas.

---

<sup>1</sup> Mediante técnicas de grafos y métodos matemáticos, que permiten identificar algunos nodos y sectores “componentes” neurales relacionados a capacidades psicológicas.

## **MODELO MECANICISTA Y SUS LÍMITES**

Como anticipamos en el apartado anterior el modelo mecanicista de explicación se ha propuesto recientemente en psicología, sobre todo como un modelo que permite capturar los casos de explicaciones que relacionan capacidades psicológicas con mecanismos neurobiológicos. Este modelo se fundamenta en una perspectiva naturalista de análisis de las prácticas científicas en las que, de acuerdo Wright y Bechtel (2007), lo que los investigadores intentan hacer es dilucidar los mecanismos responsables de los distintos fenómenos estudiados; donde el objetivo principal es determinar “cómo” es que se llevan a cabo los diferentes procesos, y qué estructuras los posibilitan. Es decir, los científicos pretenden explicar los fenómenos estudiados a partir de la descripción de los mecanismos responsables de los mismos, los cuales involucran estructuras físicas específicas.

Los mecanismos se definen entonces como “estructuras que realizan una función en virtud de sus entidades componentes, las actividades u operaciones de dichas entidades y su organización” (Bechtel & Abrahamsen, 2005, p. 423); o, en otra definición, como “las entidades y actividades organizadas, que son productoras de cambios regulares desde el comienzo o condiciones de principio a condiciones finales o de terminación” (Machamer et al., 2000: p.3).

La descomposición (del fenómeno global en partes o entidades) y la localización (de las entidades en estructuras y procesos físicos concretos) son estrategias privilegiadas a la hora de reconstruir un modelo del mecanismo que da cuenta del fenómeno de interés. A su vez, los componentes del mecanismo, con sus respectivas actividades y relaciones causales, se encuentran organizados espacial y temporalmente, por ello la comprensión de las partes y las operaciones se complementa con enfoques orientados a la apreciación de propiedades sistémicas. En este sentido, los niveles superiores aportan herramientas para contextualizar las partes y operaciones tanto en el mecanismo como un conjunto, como respecto al ambiente en el que está inserto y los factores causales que lo afectan, mientras que la comprensión de las entidades constitutivas y sus operaciones impone constricciones a dichos modelos.

De este modo, los modelos mecanicistas comprenden múltiples niveles, puesto que una explicación será más adecuada en tanto integre información de los distintos niveles de complejidad. Al ser trazados los niveles de manera local, a partir de la descomposición iterativa del mecanismo en sus partes y operaciones componentes, la integración multinivel se dará respecto a los fenómenos concretos en estudio, distinguiéndose así de propuestas que asumen una estratificación general en niveles de naturaleza. La propuesta de explicación mecanicista se posiciona entonces, en un punto intermedio entre propuestas reduccionistas y funcionalistas.

Las reduccionistas sostienen la importancia de los niveles más básicos de explicación, sin considerar los niveles superiores salvo por propósitos heurísticos; y las propuestas funcionalistas, plantean la independencia de los niveles superiores de información respecto a las explicaciones neurocientíficas.

A pesar de la proliferación y popularización del modelo mecanicista en neurociencias y psicología cognitiva, este ha sido objeto de diversas críticas. Una de las más fuertes y actuales reside en sus límites para dar cuenta de los mecanismos como sistemas complejos y dinámicos, altamente integrados temporalmente, con interacciones no lineales, una alta cohesión entre los componentes, y en una relación estrecha con el entorno.

Esta crítica abarca dos grandes niveles, uno más general que refiere al sujeto como agente en complejas relaciones con el medio en que está inserto (Chemero & Silberstein, 2008). Y otro más básico en relación a la cantidad de neuronas, la extensión de las redes neuronales y su flexibilidad. En ambos niveles, las clásicas estrategias heurísticas de descomposición y localización propuestas en el marco del modelo mecanicista colapsan dadas las dificultades a la hora de identificar componentes precisos involucrados (Silberstein & Chemero, 2012; Zednik, 2012). En el presente trabajo nos focalizaremos en este segundo nivel neuronal.

En este contexto, han sido señalados dos aspectos importantes cuando se aborda lo que se ha llamado “neurociencia de sistemas” respecto a los cuales el modelo mecanicista se vería seriamente limitado. Por una parte, se ha destacado que las diferentes redes muestran una actividad coordinada, que involucra mecanismos de reentrada, causación recíproca continua, una alta variabilidad en cortos periodos de tiempo y auto-organización (Michael Silberstein & Chemero, 2012, p. 5); nombraremos a esto como el *aspecto dinámico de las redes*. Por otra parte, se ha señalado la gran cantidad de neuronas en el cerebro, sus conexiones y la actividad altamente distribuida del cerebro en lo que refiere a capacidades cognitivas complejas. Este desafío a la explicación mecanicista se ha denominado *“tamaño/extensión de la escala” (largeness of scale)*.

Si bien no hay consenso en cuanto a la cantidad de neuronas y sus conexiones que pueden estar activas en un momento dado, nadie duda que la cantidad mínima en disputa hace difícil que pueda captarse con técnicas tradicionales, salvo a un nivel de “grano grueso” que no refleja fielmente esa actividad y que ha mostrado ser insuficiente para explicar desafíos como el problema de la conciencia o de las psicopatologías. Se estima que pueden estar activas al mismo tiempo un 3% del total de neuronas o un 10% del total de la corteza (lo que daría una cifra aproximada de 3.000.000.000 de neuronas). Esto obviamente no implica que constituyan

una sola estructura o que una función abarque todas ellas, pero nos da una dimensión de la complejidad debida a la cantidad de unidades que intervienen y de sus conexiones posibles. Los casos que pueden entenderse desde un punto mecanicista hasta ahora involucraron pocas unidades y surge naturalmente la duda si el posible escalar esas cantidades y mantenerse dentro de este modelo explicativo.

Algunos autores han propuesto que a la hora de capturar, describir y explicar estos aspectos, *dinámico* y de *extensión de escala*, los modelos dinámicos y gráficos resultarían más adecuados (M. Silberstein & Chemero, 2012; Zednik, 2012). En el próximo apartado revisaremos algunas de las características de estos modelos por las cuales se ha sostenido que resultarían más adecuados. Posteriormente analizaremos, como anticipamos, nueva evidencia acerca de lo que ha dado en llamarse “conectoma”, puesto que se ha argumentado que la simplificación de redes en este tipo de investigaciones permitiría superar el problema de la *extensión de escala*, posibilitando continuar sosteniendo explicaciones mecanicistas. A su vez, dicha evidencia ha sido presentada para argumentar la necesidad de explicaciones dinámicas para capturar los aspectos de las redes y el cerebro como sistema, y objetar ciertos límites de los modelos mecanicistas. De esta forma, los estudios sobre conectividad cerebral o proyecto “conectoma” se presentan como un punto interesante que atraviesa las discusiones acerca de los modelos adecuados a la hora de capturar el tipo de explicaciones sobre procesos cerebrales asociados a capacidades cognitivas complejas.

## **MODELOS DINÁMICOS**

Los modelos dinámicos se han caracterizado por representar los cambios de estados de un sistema determinado a través del tiempo. En esta dirección han involucrado generalmente el uso de herramientas matemáticas de la teoría de los sistemas dinámicos no lineales mediante las cuales pueden especificarse, en un conjunto de ecuaciones diferenciales, los patrones que rigen dichos cambios (van Gelder, 1998).

Como puede notarse en este modelo es central la noción de estado del sistema (que involucra características espaciales) y la noción temporal, focalizando la explicación en la estructura del espacio de posibles trayectorias del sistema y las fuerzas internas y externas que las moldean. El modelo debiera brindar alguna ecuación diferencial que permita explicar por qué el sistema está en el estado que está y predecir cómo podría estar (van Gelder, 1991, p.

500). A estos fines ha cobrado principal relevancia también la especificación de las condiciones de contorno que determinan el fenómeno en estudio.

Venturelli (2012) además ha destacado como uno de los presupuestos principales del enfoque dinámico el hecho de contemplar escalas temporales anidadas. Esto es, las dinámicas de una escala temporal son continuas con, y están anidadas en, las dinámicas de las otras, por lo que estos modelos buscan dar cuenta de las interacciones temporales a diferentes escalas. En este punto el lenguaje matemático de la teoría de sistemas dinámicos justamente permite capturar múltiples influencias simultáneas, caracterizadas a menudo por tasas de cambio diferentes (p.156).

A diferencia de los modelos mecanicistas, una característica central de los modelos dinámicos es que permiten abstraer las explicaciones del detalle micro-estructural y predecir cualitativamente los cambios y características del sistema macroscópico. Es por ello que luego un mismo modelo dinámico puede ser mapeado para la explicación de algunos sistemas similares por más que no se compartan exactamente los mismos “componentes” (Walmsley, 2008). Ejemplo de ello es el caso del modelo de coordinación bi-manual<sup>2</sup> que posteriormente pudo ser aplicado a la coordinación de diferentes partes del cuerpo (Haken, Kelso, & Bunz, 1985).

Es claro que mediante este tipo de modelos se busca, además de capturar los patrones de cambio de un sistema en el tiempo, establecer ciertas regularidades que sean en alguna medida generalizables. Esta característica ha contribuido a que diversos autores sostengan que los modelos dinámicos pretenden establecer explicaciones de cobertura legal (Bechtel, 1998; Stepp, Chemero, & Turvey, 2011; Walmsley, 2008). Por otra parte, Zednik (2012) ha señalado que el modelo dinámico no necesariamente deben ligarse o brindar explicaciones de cobertura legal, y que estos modelos ofrecerían explicaciones “unificacionistas” (siguiendo a la

---

<sup>2</sup> Este modelo se presentó a fines de explicar ciertos fenómenos relativos al movimiento rítmico de los dedos de las manos, los cuales tienden a coordinarse o a estar en “fase” (los dedos de ambas manos involucrando músculos y movimientos homólogos) cuando la velocidad del movimiento supera un punto crítico. Los autores pudieron dar cuenta de dicha coordinación describiendo los movimientos de ambas manos como dos osciladores no lineales acoplados autónomos, para cuya explicación se apeló a un sistema de ecuaciones diferenciales con variables para la fase relativa y para la frecuencia de las oscilaciones.

Este modelo explica la formación de estados ordenados de coordinación en seres humanos sobre la base de algunas características fundamentales de auto-organización, como lo son la multiestabilidad, las transiciones de fase (conmutación) y la histéresis. Para dar cuenta de la conducta auto-organizada, tanto en el nivel del fenómeno cooperativo de coordinación como respecto de los elementos individuales coordinados, en el modelo se aplican conceptos de la sinérgica (parámetros de orden, parámetros de control, inestabilidad) y herramientas matemáticas de los sistemas dinámicos no lineales acoplados.

caracterización de Kitcher, 1981), siendo este un aspecto más interesante, que permitiría encontrar un modelo de explicación que subsuma más de un fenómeno. Retomando nuevamente el ejemplo del modelo de coordinación bi-manual, este pudo posteriormente subsumir diversos fenómenos como la producción del habla, la locomoción animal, la coordinación interpersonal y una amplia variedad de otros fenómenos. Esta generalización del modelo a diferentes tipos de fenómenos de coordinación, elimina la necesidad de desarrollar y confirmar de forma independiente nuevos modelos o teorías independientes para cada uno de estos casos).

Ahora bien, teniendo en cuenta los límites señalados al modelo mecanicista que presentamos en el apartado anterior a la hora de capturar algunos aspectos de las redes neurales vinculadas a capacidades psicológicas complejas (aspecto dinámico de las redes y el problema de la extensión/tamaño), puede apreciarse ahora con más claridad en qué medida los modelos dinámicos permitirían dar cuenta de dichos aspectos. Debido a la centralidad que tiene para los modelos dinámicos la caracterización temporal de los fenómenos, estos pueden precisar la alta variabilidad en las redes ante alteraciones contextuales. A su vez, la focalización de estos modelos en las características macroscópicas del sistema también pueden explicar de forma más adecuada los patrones de auto-organización. Finalmente, la apreciación de dinámicas anidadas, sumado a que no es necesario precisar de manera discreta cada componente permite describir e incluir en la explicación casos de causación recíproca continua sin mayores dificultades.

Por otra parte, respecto al problema de la extensión/tamaño de la escala, los modelos dinámicos, nuevamente, al poder abstraerse de los componentes microscópicos y brindar características generales, también pueden ofrecer modelos más simplificados dejando de representar un problema la extensión de la escala (cantidad de redes, neuronas y conexiones).

En otra dirección, Zednik (2012) ha propuesto que respecto al problema de la extensión de la escala los estudios sobre el “conectoma” que se están llevando a cabo permitirían obtener alguna descripción detallada de los componentes involucrados en cada función psicológica. Ha presentado, además, algunas técnicas usadas como la de “poda” postulada por Izquierdo y Beer (2013) en donde se eliminan las conexiones más débiles y las de muy largo alcance, lo que deja redes de conexiones mínimas y simplificadas. Este tipo de aproximaciones, al simplificar la complejidad de las redes y brindar algunos componentes (como ser nodos y hubs), permitirían, de acuerdo a Zednik, que las explicaciones de tipo mecanicista continúen

siendo plausibles para en la explicación de capacidades psicológicas basadas en complejas redes neuronales con un número muy grande de elementos y conexiones.

## CONECTOMA

El término “conectoma” se ha utilizado para designar al proyecto que consiste en mapear el conjunto total de neuronas, sinapsis y redes neurales del cerebro. Aunque la posibilidad de mapear todas las conexiones del cerebro humano aún es distante, las investigaciones que se han propuesto en esta dirección en años recientes son numerosas. Algunos de los proyectos propuestos son: el *proyecto conectoma humano* (NIH Human Connectome Project) del Instituto Nacional de Salud (NIH) de Estados Unidos; el proyecto BAM (Brain Activity Map Project) del mismo país; el proyecto BLUE BRAIN PROJECT de Europa, que incluye una mayor inclusión de simulaciones y focalización en el aspecto dinámico de las redes; y finalmente en China también se ha institucionalizado el proyecto BRAINETOME.

En el marco de estas investigaciones, ya se ha logrado determinar el conectoma del nemátodo *Caenorhabditis elegans*, un organismo muy simple que tiene 302 neuronas, en el que han podido identificarse 7000 conexiones. El conectoma estructural se obtuvo en el año 1986 (White, Southgate, Thomson, & Brenner, 1986) pero recién en el 2011 (Varshney, Chen, Paniagua, Hall, & Chklovskii, 2011) se logró determinar en casi su totalidad el conectoma funcional, entendiendo por tal, la determinación del flujo de las señales entre las 302 neuronas. Esto da una idea en alguna medida de la complejidad que involucra esta tarea, si se considera que el cerebro humano está constituido por un número de  $10^{11}$  neuronas y se estima que debe tener un aproximativo de  $10^{14}$  conexiones. Por ello es que este tipo de estudios dependen en gran medida de métodos de análisis de la teoría de grafos y la información para caracterizar y simplificar la organización funcional y estructural de las grandes redes neuronales (Sporns, 2010).

Algunos resultados de las investigaciones sobre conectividad han re-editado la clásica discusión acerca de la relación estructura/función, esto es en qué medida las estructuras de las redes o “cableado”, permiten predecir las funciones cerebrales. A pesar de la posibilidad creciente de identificar de manera precisa cada célula y sus conexiones, no está claro que esto resulte en una explicación satisfactoria de las capacidades psicológicas.

La relación estructura/función a su vez afecta de manera directa la discusión acerca del modelo de explicación adecuado para capturar el tipo de explicación que se pretenden

mediante estas investigaciones. Si las estructuras predicen las funciones, y por tanto las funciones son asociadas a estructuras discretas, sus actividades y organización, entonces esto permitiría postular al modelo mecanicista como el adecuado para capturar las características de dichas explicaciones. Ahora bien, si esto no sucede, la posibilidad de brindar explicaciones mecanicistas se vería fuertemente restringida.

En este marco, las investigaciones sobre conectividad han sido retomadas de manera contrapuesta, Zednik (2012) como ya adelantamos, considera que el “conectoma” permitiría identificar explicaciones de tipo mecanicistas en un nivel más alto que el de neuronas individuales, e incluso superar algunos límites como el *problema de la extensión de la escala* que presentaban las heurísticas de descomposición y localización características de dicho modelo. En sentido contrario Silberstein y Chemero (2012) han presentado evidencias sobre conectividad y dinámicas neurales para señalar los límites del modelo mecanicista y la necesidad de los modelos dinámicos que den cuenta de este tipo de fenómenos.

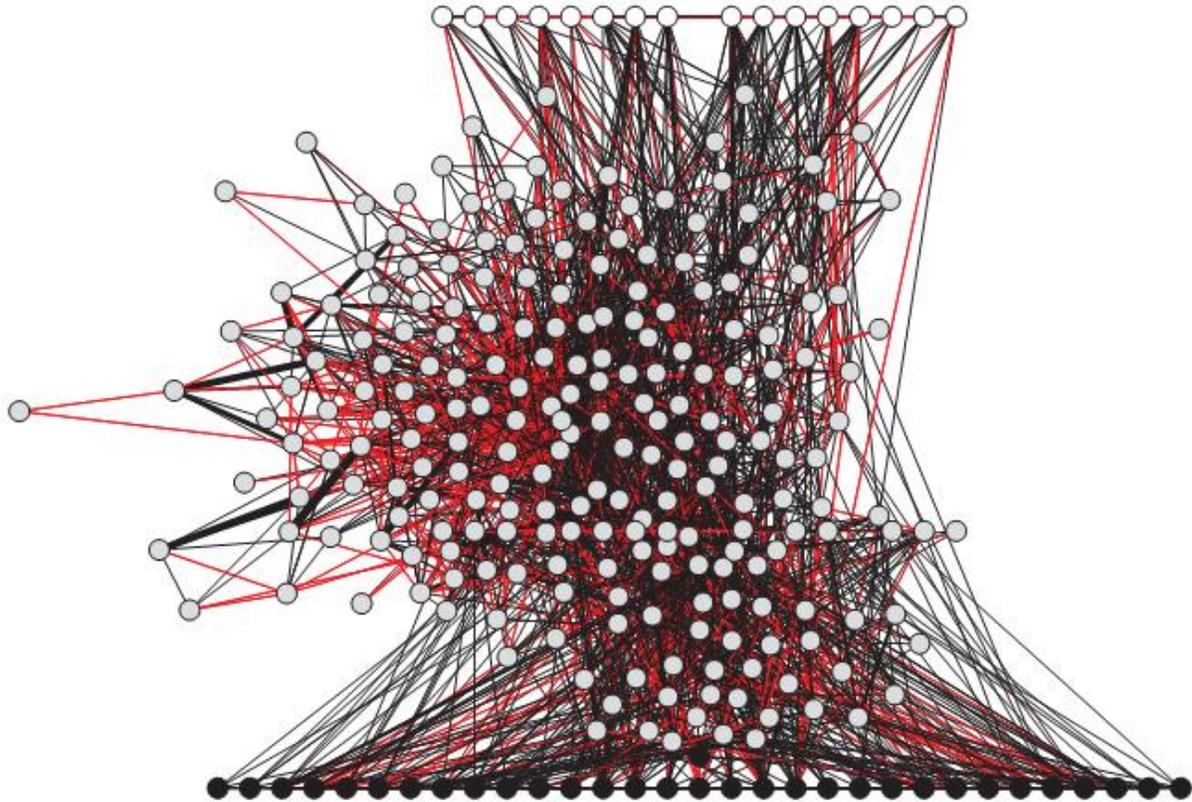
A diferencia de los primeros modelos de conectividad cerebral que presuponían que las interconexiones entre neuronas eran aleatorias (Uttley, 1955), estudios realizados mediante métodos como la difusión de tensores por resonancia magnética funcional y la espectroscopia de luz, han mostrado que las redes siguen algunos principios organizacionales que son comunes a otras redes complejas (redes de comunicación, redes sociales) como la topología de “pequeños mundos” (Modha & Singh, 2010). Esta característica hace referencia a que las unidades individuales están altamente conectadas a las neuronas más próximas -formando clusters locales- y conectadas más escasamente a unidades más distantes (Bassett & Bullmore, 2006, p. 512). Este tipo de organización puede comprenderse de manera intuitiva si se piensa, por ejemplo, en las redes sociales, en las cuáles es probable que dos amigos cercanos tengan amigos en común (constituyen así un agrupamiento). La organización en “pequeños mundos” puede ejecutar formas distribuidas e integradas de información, atributo que posibilita que el cerebro mantenga sus funciones a pesar de daños importantes en algunas de sus partes. Esto además permite minimizar el costo del cableado habilitando una alta complejidad dinámica.

Por otra parte, se han identificado “motif”, esto es, pequeños circuitos de interacciones recurrentes a partir de los cuales las redes se constituyen (Alon, 2007). La evidencia muestra que hay nodos en donde se procesa información específica, pero a su vez numerosos patrones de conexión inter nodos y “hubs” que coordinan la forma en que se integra la información. Es decir que en el cerebro no se procesa todo simultáneamente de manera indiscriminada, y

existe alguna organización jerárquica que puede ser descripta mediante la identificación de componentes y sus actividades. El modelo mecanicista podría resultar adecuado para capturar estos atributos de las explicaciones sobre conectividad. Sin embargo, como intentaremos mostrar, los problemas antes planteados respecto al aspecto dinámico de las redes, las restricciones que esto impone a la hora de establecer algunas localizaciones, y por otra parte el problema de la extensión de la escala no han podido ser resueltos aún.

Para Zednik (2012) algunos trabajos sobre conectividad muestran que es posible establecer mecanismos para redes neuronales complejas mediante tecnología de imágenes y análisis matemático. Estos métodos matemáticos permiten, como mencionamos anteriormente, desarrollar descripciones simplificadas de mecanismos que son demasiado grandes para describir en detalles (p. 87-8).

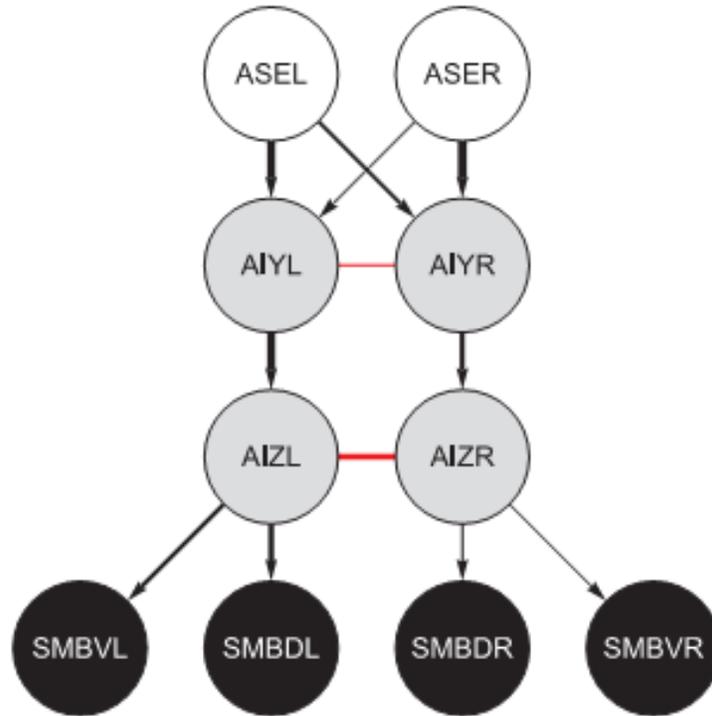
Zednik ha ejemplificado esta posibilidad usando los estudios de Izquierdo y Beer (2013) sobre la “klinotaxis” en la *C. Elegans*, una forma de “chemotaxis” (movimiento hacia o alejándose de químicos) en que los cambios de orientación son dirigidos hacia la fuente a través de ajuste graduales (no aleatorios) continuos. La red de la “klinotaxis” está contenida en la red máxima (Fig. 1), pero seguramente involucra un subconjunto más pequeño de neuronas. Si de las 302 neuronas que componen este sistema nervioso, tomamos solamente los 8 pares de neuronas que registran cambios químicos y las 10 vinculadas al cuerpo y la cabeza, las conexiones que vinculan a estos dos conjuntos abarcan el 90,72% de todas las neuronas y el 97,95% de todas las sinapsis y uniones en hendidura (gap junction).



**Figura 1.** Red Máxima.

Extraída de Izquierdo y Beer (2013) Connecting a Connectome to Behavior: An Ensemble of Neuroanatomical Models of *C. elegans* Klinotaxis. Pág.4

La “klinotaxis” que como dijimos, está incluida en la red máxima es posible simplificarla eliminando, por ejemplo, vías muy largas que probablemente no tengan efectos debido al ruido o porque las conexiones que sean muy débiles como para tener efectos causales. Estas y otras simplificaciones como restricciones experimentales que se conocen resultarían en la siguiente red mínima:



**Figura 2.** Red Mínima.

Extraída de Izquierdo y Beer (2013) Connecting a Connectome to Behavior: An Ensemble of Neuroanatomical Models of *C. elegans* Klinotaxis. Pág.5

La red de la klinotaxis real está entre la red máxima y la mínima. Los autores consideran que es importante estudiar la red mínima, a pesar de que no es la real, porque ofrece la neuroanatomía básica para producir la conducta en cuestión. De todas formas, han advertido que este modelo simplificado podría fracasar en alguna contrastación con datos experimentales, en cuyo caso han sugerido que el modelo se podría ampliar o modificar incorporando más neuronas o conexiones.

Ahora bien, no es del todo claro que este trabajo brinde alguna evidencia en apoyo a la tesis de que el modelo de explicación mecanicista resulta adecuado para capturar las explicaciones en neurociencias tal como defiende Zednik (2012). En primer lugar, los autores no sólo utilizan simulaciones y algunos algoritmos evolutivos (que abstraen el modelo de los componentes estructurales reales), sino que además los modelos alternativos generados son numerosos. Se presenta un conjunto de ellos que muestran una alta eficiencia para distintos valores que permiten completar información de la que no se dispone experimentalmente (registro electrofisiológico entre las neuronas). Como ellos mismos han afirmado:

Una característica clave de este enfoque es que el resultado no es un modelo único, sino más bien un conjunto de modelos que son consistentes con el conocimiento actual del sistema de interés. Mediante el estudio de la estructura de este conjunto, se pueden formular nuevos experimentos que puedan distinguir entre las diferentes clases de posibilidades. (Izquierdo & Beer, 2013, p. 15)

En este sentido, al menos en el trabajo de Izquierdo y Beer (2013) no se presenta un modelo “mecanicista” que explique la conducta de la *C. elegans*, sino que se brindan numerosos modelos abstractos, funcionales, a ser testeados y completados mediante información experimental (esto incluye mayor detalle sobre las estructuras, los neuromoduladores involucrados y características electro-químicas). Así es que, si bien la simplificación resulta plausible, esto no constituye una explicación mecanicista. Recordemos que este tipo de explicación involucra detallar todos los componentes constituyentes, sus actividades y organización.

El problema de la *extensión de la escala* y la complejidad respecto a la cantidad de neuronas/sinapsis para brindar una explicación mecanicista no se resuelve mediante una simplificación matemática puesto que en ello se abandona la pretensión de ofrecer una explicación de tal tipo. Asimismo, la idea de que esta información podría ser completada mediante evidencia experimental es sólo un presupuesto tentativo y no puede saberse si esto daría lugar a un único modelo que explique la “Klinotaxis”, o que todos los modelos generados con alta eficiencia sean también explicativos. Bargmann (2012) ha mostrado experimentalmente que esta última posibilidad se da efectivamente en la evitación del “octanol” de la *C. Elegans*, donde habría por lo menos dos redes neuronales diferentes para generar la misma conducta cuya activación está determinada por neuromoduladores en base a la suficiente o pobre alimentación. En estos casos la variación en la condición de que el nematodo esté alimentado o no, influye de manera directa en que la red asociada al comportamiento varíe. De acuerdo a la autora, el mapeado de las estructuras sólo ofrecería un marco para experimentar en diferentes situaciones.

Esta sensibilidad al contexto deflaciona en gran medida la posibilidad de “localizar” algunas funciones en estructuras concretas, y por tanto de establecer explicaciones mecanicistas. Si bien en el caso presentado por Bargmann (2013) sólo se presentan dos redes estructurales alternativas, en cuyo caso quizás aún se podrían establecer explicaciones sobre el mecanismo involucrados en cada caso (cuando la *C. elegans* está alimentada o cuando no lo está), en los experimentos de Izquierdo y Beer la cantidad de modelos posibles es notablemente más extensa. Sin mencionar el hecho de que este trabajo focaliza un comportamiento

extremadamente simple de un organismo que tiene sólo 302 neuronas. En este sentido Bargmann (2012) ha advertido que

los diagramas de cableados son incompletos porque la conectividad funcional es activamente moldeada por los neuromoduladores que modifican la dinámica neuronal, excitabilidad y función sináptica, [esto posibilita que] los circuitos cambien rápidamente, de forma dinámica y reversible (p.458).

La identificación de algunos atributos de la organización de las redes neurales como los que mencionamos anteriormente (características de “pequeños mundos”, nodos, hubs, motif), no permiten capturar estas características altamente sensibles a los cambios ambientales y flexibles. Por otra parte, no solo ocurre que muchas estructuras se relacionan a una misma función sino que la misma estructura puede dar lugar a diferentes funciones. Conocer el conectoma estructural no asegura que puedan predecirse funciones o el comportamiento posterior dado que podría ocurrir que se produzcan diferentes transmisiones dentro de esa misma estructura. Como lo ha expresado en términos simples el reciente premio nobel de medicina Südhof:

En principio se podría decir que todas las neuronas hablan el mismo idioma, pero digamos que hablan distintos dialectos del mismo idioma.

Existen químicos especiales que son enviados por las neuronas para que hablen con otras neuronas. El idioma no sólo consiste en enviar las señales, sino también en su frecuencia. Una neurona puede mandar una sola señal o una ráfaga de señales. Es casi como una clave morse, donde no sólo es importante la señal en sí misma, sino también el espacio que hay entre esas señales, así como el número de señales.

En este sentido, las neuronas y células nerviosas hablan entre ellas en distintos dialectos porque usan códigos ligeramente diferentes para hablar entre ellas. Pero todas hablan el mismo idioma, en el sentido de que todas usan el mismo principio (2013).

Si se admite la posibilidad de que por el cableado neuronal pueden pasar diferentes “mensajes” como lo señala Südhof, es claro que podemos tener varias funciones a partir de una misma estructura, independientemente de cómo podría detectarse esto mediante diferentes registros (estructurales, eléctricos, químicos). A pesar de que el modelo de explicación mecanicista contempla las relaciones espaciales y temporales de los componentes de un mecanismo, el modelo no permite capturar los casos en el que estas relaciones son altamente dinámicas. Esto nos remite nuevamente al problema del *aspecto dinámico* de las redes.

En este mismo sentido, Park y Friston (2013) señalan también la dificultad de vincular o predecir funciones a partir de estructuras debido a que la inherente sensibilidad de la

integración funcional lleva a una divergencia funcional. Las funciones podrían desviarse de la estructura para exhibir conducta dinámica y contextualizada. Tal divergencia de funciones de estructuras es, quizás, la más intrigante propiedad del cerebro e invita a una intensiva investigación futura.(Park & Friston, 2013, p. 579)

Los modelos dinámicos se han mostrado particularmente adecuados para capturar algunas de estas características dado que, como pudimos explicar en el apartado anterior, permiten capturar con gran detalle aspectos temporales. Asimismo estos modelos focalizan patrones generales en los cambios del sistema, y al no centralizar componentes individuales precisos, no se ve afectado por problemas planteados respecto a la relación estructura/función anteriormente expuestos que se dan a nivel de las conexiones.

De todas formas, aunque los modelos dinámicos se muestran adecuados a la hora de capturar dichos aspectos, estos tipos de explicaciones no han sido tan desarrolladas aún y mucho resta por investigar. Además algunos autores han enfatizado la importancia de aunar distintas técnicas que rescaten distintos aspectos de las redes (Bargmann & Marder, 2013; Izquierdo & Beer, 2013). En esa dirección, se ha puesto de relieve la importancia de los modelos estructurales de redes neurales identificados como modelos base que permiten modelar organizaciones más complejas. Es decir que, aunque en el estado actual de las investigaciones no pueden establecerse relaciones muy estrictas estructura/función a nivel de las redes neurales, la identificación de estructuras precisas ha resultado iluminadora para avanzar respecto a lo que conocemos sobre las funciones y dinámicas cerebrales.

Resulta interesante analizar, aunque no podremos hacerlo en este trabajo, qué tipo de relación puede establecerse entre los diversos modelos de explicación y de qué forma pueden ser complementados para abarcar los distintos tipos de explicaciones que se dan en las prácticas científicas, a la hora de capturar niveles y aspectos de los procesos neurobiológicos y su relación con capacidades psicológicas complejas. Aunque el modelo mecanicista se había propuesto como una alternativa multinivel que vincula capacidades psicológicas con componentes estructuralmente precisos, los límites que presenta este tipo de explicación a nivel de las redes neurales, permiten arriesgar que las relaciones entre dichas capacidades psicológicas y los componentes estructurales son algo más complejas, y deberán involucrar diferentes técnicas experimentales, de simulación y análisis de información. Es de esperar que el modelo que permita capturar esa diversidad de explicaciones no sea único y que distintos modelos deban complementarse para reflejar esa diversidad.

## CONCLUSIONES

Los modelos mecanicistas de explicación que se propusieron a comienzo de 1990 en filosofía de la psicología y neurociencias estuvieron basados en ejemplos que no involucraban gran cantidad de partes altamente conectadas o relacionadas con otras. La necesidad de recurrir a esos niveles para explicar capacidades y discapacidades psicológicas o el funcionamiento del cerebro ha cuestionado la generalidad de este modelo de explicación. En este trabajo hemos tratado de mostrar la importancia que tiene la relación estructura-función para evaluar los límites del mecanicismo y la necesidad de complementarlo con explicaciones dinamicistas.

A tales fines presentamos algunos ejemplos que reflejan las dificultades que tiene el mecanicismo cuando se enfrenta a evidencias en las que varias estructuras alternativas pueden relacionarse a una misma función, y cuestionamos el hecho de que en esos casos puedan continuar siendo estrategias privilegiadas la localización y descomposición. Incluso, estimamos que las evidencias a favor de que muchas funciones puedan generarse a partir de una misma estructura constituyen un desafío más problemático para la explicación mecanicista.

En este marco intentamos mostrar que el modelo dinámico permitiría dar cuenta de patrones generales del comportamiento del sistema, y de la dimensión temporal que se ha señalado tan importante en los estudios de conectividad. Futuros trabajos son necesarios para establecer en qué medida este modelo puede complementarse con algunas explicaciones de tipo mecanicista, y qué modelo/s son necesarios para capturar el tipo de explicaciones que se dan cuando se intentan relacionar capacidades psicológicas con algunas estructuras y procesos neurobiológicos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alon, U. (2007). Network motifs: theory and experimental approaches. *Nature Reviews Genetics*, 8(6), 450-461. doi:10.1038/nrg2102
- Bargmann, C. I. (2012). Beyond the connectome: How neuromodulators shape neural circuits. *BioEssays*, 34(6), 458-465. doi:10.1002/bies.201100185
- Bargmann, C. I., & Marder, E. (2013). From the connectome to brain function. *Nature Methods*, 10(6), 483-490. doi:10.1038/nmeth.2451

- Bassett, D. S., & Bullmore, E. (2006). Small-World Brain Networks. *The Neuroscientist*, 12(6), 512-523. doi:10.1177/1073858406293182
- Bechtel, W. (1998). Representations and cognitive explanations: Assessing the dynamicist's challenge in cognitive science. *Cognitive Science*, 22(3), 295-317. doi:16/S0364-0213(99)80042-1
- Bechtel, W. (2007). Reducing psychology while maintaining its autonomy via mechanistic explanations. En M. Schouten & H. L. De Joong (Eds.), *The Matter of the Mind: Philosophical Essays on Psychology, Neuroscience and Reduction*. Blackwell Publishing.
- Bechtel, W. (2008). *Mental mechanisms: philosophical perspectives on cognitive neuroscience*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Bechtel, W., & Abrahamsen, A. (2005). Explanation: a mechanist alternative. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 36(2), 421-441. doi:10.1016/j.shpsc.2005.03.010
- Bechtel, W., & Richardson, R. (2010). *Discovering Complexity: Decomposition and Localization as Strategies in Scientific Research*. The MIT Press.
- Bickle, J. (2003). *Philosophy and neuroscience: a ruthlessly reductive account*. Springer.
- Chemero, A., & Silberstein, M. (2008). After the Philosophy of Mind: Replacing Scholasticism with Science. *Philosophy of Science*, 75(1), 1-27.
- Craver, C. F. (2007). *Explaining the brain: mechanisms and the mosaic unity of neuroscience*. Clarendon Press.
- Haken, H., Kelso, J. A., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological cybernetics*, 51(5), 347-356.

- Izquierdo, E. J., & Beer, R. D. (2013). Connecting a Connectome to Behavior: An Ensemble of Neuroanatomical Models of *C. elegans* Klinotaxis. *PLoS Comput Biol*, 9(2), e1002890. doi:10.1371/journal.pcbi.1002890
- Kitcher, P. (1981). Explanatory Unification. *Philosophy of Science*, 48(4), 507–531.
- Looren de Jong, H. (2002). Levels of explanation in biological psychology. *Philosophical Psychology*, 15, 441-462.
- Modha, D. S., & Singh, R. (2010). Network architecture of the long-distance pathways in the macaque brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(30), 13485-13490. doi:10.1073/pnas.1008054107
- Park, H.-J., & Friston, K. (2013). Structural and Functional Brain Networks: From Connections to Cognition. *Science*, 342(6158), 1238411. doi:10.1126/science.1238411
- Piccinini, G., & Craver, C. (2011). Integrating Psychology and Neuroscience: Functional Analyses as Mechanism Sketches. *Synthese*, 183(3), 283–311.
- Silberstein, M., & Chemero, A. (2012). Constraints on Localization and Decomposition as Explanatory Strategies in the Biological Sciences. Recuperado 24 de agosto de 2012, a partir de <http://philsci-archive.pitt.edu/9195/>
- Silberstein, Michael, & Chemero, T. (2012). Constraints on Localization and Decomposition as Explanatory Strategies in the Biological Sciences. Recuperado a partir de <http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/9195>
- Sporns, O. (2010). *Networks of the Brain*. MIT Press.
- Stepp, N., Chemero, A., & Turvey, M. T. (2011). Philosophy for the Rest of Cognitive Science. *Topics in Cognitive Science*, 3(2), 425–437. doi:10.1111/j.1756-8765.2011.01143.x

- Südhof, T. (2013, noviembre 1). Nobel de Medicina: «La verdad científica a veces está castrada». Recuperado a partir de:  
[http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2013/11/131031\\_salud\\_nobel\\_medicina\\_responde\\_lectores\\_gtg.shtml](http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2013/11/131031_salud_nobel_medicina_responde_lectores_gtg.shtml)
- Uttley, A. M. (1955). The Probability of Neural Connexions. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B - Biological Sciences*, 144(915), 229-240. doi:10.1098/rspb.1955.0054
- Van Gelder, T. (1991). Connectionism and dynamical explanation. En *Proceedings of the Thirteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. (pp. 499-503). Hillsdale N.J.: L. Erlbaum Associates.
- Van Gelder, T. (1998). The dynamical hypothesis in cognitive science. *The Behavioral and brain sciences*, 21(5), 615-628; discussion 629-665.
- Varshney, L. R., Chen, B. L., Paniagua, E., Hall, D. H., & Chklovskii, D. B. (2011). Structural Properties of the *Caenorhabditis elegans* Neuronal Network. *PLoS Computational Biology*, 7(2), e1001066. doi:10.1371/journal.pcbi.1001066
- Venturelli, N. (2012). ¿Puede hablarse de una explicación dinamicista en las ciencias cognitivas? *Ludus Vitalis*, XX(37), 151-174.
- Walmsley, J. (2008). Explanation in Dynamical Cognitive Science. *Minds Mach.*, 18(3), 331–348. doi:10.1007/s11023-008-9103-9
- White, J. G., Southgate, E., Thomson, J. N., & Brenner, S. (1986). The Structure of the Nervous System of the Nematode *Caenorhabditis elegans*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 314(1165), 1-340. doi:10.1098/rstb.1986.0056

Wright, C., & Bechtel, W. (2007). Mechanisms and psychological explanation. En P. Thagard (Ed.), *Philosophy of Psychology and Cognitive Science* (pp. 31-79). Amsterdam: North-Holland.

Zednik, C. (2012). *Mechanistic explanation and dynamical cognitive science*. ProQuest, UMI Dissertation Publishing.