

# EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XX JORNADAS

VOLUMEN 16 (2010)

Pío García  
Alba Massolo

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



## El enfoque dinamicista en las neurociencias cognitivas: un abordaje histórico a partir del concepto de metaestabilidad

Nicolás Venturelli\*

### Introducción

A través de una mirada puesta en la aplicación del concepto de metaestabilidad en las neurociencias cognitivas (NC), se presentan dos programas de investigación caracterizados por el uso extensivo del aparato matemático de la teoría de los sistemas dinámicos (TSD): el programa en neurodinámica liderado por Walter Freeman y el programa en dinámica de la coordinación llevado adelante por Scott Kelso y colaboradores. Tras una contextualización histórica, se delimitan criterios epistemológicos comunes con el objetivo de enmarcar dichos programas en lo que denomino el enfoque dinamicista en NC. Esta caracterización se hace eco del abordaje general delineado, entre otros por van Gelder y Port (1995) y Beer (2000), para las ciencias cognitivas y apunta así en la dirección de justificar un alejamiento respecto de otros enfoques neurocientíficos generalmente concebidos como en línea con el denominado paradigma del procesamiento de la información que domina el campo disciplinar en ciencias cognitivas.

### Recorrido histórico

La relevancia de un marco dinamicista para las neurociencias había ya sido anticipada por Turing (1950) en el sentido de que podía constituir una manera de permitir al sistema nervioso la velocidad y flexibilidad necesarias para la reacción instantánea ante la novedad en el medio ambiental de un agente cognitivo, un problema que en el seno de la inteligencia artificial fue luego denominado “el problema del marco” (McCarthy y Hayes 1969, Dennett 1978). Ross Ashby (1952), de modo similar, propuso que los fenómenos cerebrales debían ser estudiados en términos de sus dinámicas intrínsecas y llegó más lejos aun, al ser el primero en concebir el cerebro como un sistema que se *auto-organiza* ante circunstancias cambiantes<sup>1</sup>

En ese momento y aun posteriormente, la mayoría de los neurocientíficos suponía que la base neurofisiológica del comportamiento y la cognición debía buscarse en el nivel de neuronas individuales (un ejemplo ilustre de esta metodología es el de los premios Nobel Hubel y Wiesel 1966). Los últimos treinta años han visto sin embargo un lento desplazamiento de la dinámica desde la periferia hacia el centro de la investigación. En particular, la actual conceptualización de la actividad de las redes neuronales del cerebro es muy dinámica, más que en cualquier otro

---

\*CONICET / UNC

momento en la historia de las neurociencias (cfr., Pérez Velázquez 2005. 164). La visión emergente es la de las redes corticales, sede de los procesos cognitivos, como estructuras complejas dotadas de patrones conectivos intrincados que van desde la escala de microcircuitos locales hasta vías cortico-corticales extendidas por todo el cerebro.

En esta dirección, un punto de inflexión, en el sentido del impacto que tuvo sobre el campo, fue el descubrimiento de Wolf Singer y Charles Gray (Gray y Singer 1987) de actividad neuronal oscilatoria y sincrónica inducida por estímulo en la frecuencia predominante en el rango de 40 Hz (llamado gama): en los sistemas sensoriales, la sincronización de la fase de las oscilaciones de neuronas espacialmente distribuidas en grupos que responden a características idénticas del estímulo. Este descubrimiento puede verse como una bisagra por la que se dispara la exploración experimental de propiedades auto-organizativas de conjuntos de neuronas (cfr., Fingelkurts y Fingelkurts 2004).

Ahora, de modo central, el uso de herramientas matemáticas para la construcción de modelos en neurociencias refleja conjuntos de asunciones y objetivos generales que subyacen a la investigación. Desde el comienzo del siglo XX, las neurociencias han puesto a su servicio técnicas matemáticas tales como el cálculo diferencial y la teoría probabilística. Hay una larga y exitosa historia de la aplicación de ideas matemáticas y físicas a las NC, que produjo campos como la cibernética en los '40 del que surgieron luego disciplinas como la inteligencia artificial, la teoría de control y el modelado neuronal. Ejemplos destacados de intentos tempranos de integrar la fisiología de las neuronas con aspectos teóricos son las neuronas "formales" de McCulloch y Pitts, concebidas como unidades lógicas de umbral específico, y el modelo clásico del potencial de acción de Hodgkin y Huxley, así como esfuerzos más globales que combinaban los conocimientos anatómicos vigentes con la teoría de la computación, como en el trabajo precursor de von Neumann.

Es recién hacia fines de la década del '70, sin embargo, que el aparato matemático de la TSD (Strogatz 1994) ha sido incorporado como una herramienta preponderante en la metodología de investigación neurocientífica y, en particular, de la NC. Crucialmente, las técnicas en dinámica no lineal han evolucionado desde una formulación abstracta hasta un conjunto práctico de métodos para el análisis de datos y la construcción y verificación de modelos (cfr., Abarbanel y Rabinovich 2001. 423). Por otra parte, el interés en la búsqueda de patrones espacio-temporales a gran escala en la actividad neuronal, interés desarrollado en concomitancia con la mencionada visión dinámica de la corteza cerebral, ha sido el principal motor de esta incorporación.

Sin lugar a dudas dos de los programas de investigación pioneros, más fecundos y sostenidos en esta línea de trabajo son el programa en neurodinámica liderado por Walter Freeman (1975, 1999, Skarda y Freeman 1985, Freeman y Holmes 2005) y el programa en dinámica de la coordinación

(*coordination dynamics*) llevado adelante por Scott Kelso y colaboradores (Schöner y Kelso 1988, Kelso 1991, 1995; Bressler y Kelso 2001). Hay muchos puntos en común entre estos programas que justifican su tratamiento unificado, más allá de su carácter representativo en la utilización de la TSD: ambos fueron inspirados por el trabajo fundacional de Hermann Haken (1977, 1985) y su proyecto interdisciplinario de la sinérgica<sup>2</sup>, centrado en la formación espontánea de patrones, ambos ponen énfasis en las dinámicas a gran escala en el cerebro y, fundamentalmente, ambos se vieron dirigidos, por caminos diferentes, hacia la noción central de metaestabilidad, que aquí voy a tomar como eje de la discusión.

### **Freeman, Kelso y la metaestabilidad**

Mientras los orígenes de la noción de metaestabilidad se encuentran en la física teórica, aplicada a las NC aquella apunta a una concepción del funcionamiento del cerebro por la que sus partes individuales exhiben tendencias hacia el funcionamiento autónomo al mismo tiempo que exhiben tendencias hacia la actividad coordinada (cfr., Fingelkurts y Fingelkurts 2004). A continuación, se presentan brevemente las propuestas de Freeman y Kelso alrededor de esta concepción.

Quien quizás tenga la mayor trayectoria en el uso de la TSD en NC sea Walter Freeman. Desde 1975 Freeman ha llevado adelante un gran número de estudios sobre los principios dinámicos de los patrones ondulatorios en el cerebro que produjeron avances importantes como la caracterización de atractores, bifurcaciones y transiciones de fase. Ya en sus primeros trabajos, insistió en la necesidad de explorar patrones ondulatorios en diferentes niveles de la organización cerebral, oponiéndose a la hegemonía de la medición de células aisladas.

La investigación de Freeman se centra en la búsqueda de patrones espacio-temporales en la actividad neuronal en escalas que van desde micrones y milisegundos hasta centímetros y segundos. Generalmente usa las técnicas de medición directa de los potenciales de acción y de campo local brindadas por electroencefalogramas. Debido a su interés en las dinámicas neuronales a nivel mesoscópico, Freeman se concentró en el estudio de los potenciales de campo local, que son el resultado de corrientes que fluyen en el campo extracelular debido a la actividad dendrítica sincrónica de un grupo de neuronas en un volumen localizado de tejido cortical: es esta actividad común que tiene relevancia para entender la interacción entre áreas corticales ya que la transmisión de actividad entre un área y otra es efectiva a nivel de grupos neuronales.

Parte del trabajo de Freeman se centró en la hipótesis de la existencia de dinámicas caóticas con un rol específico para la función cerebral. En sus experimentos clásicos sobre el sistema olfatorio del conejo, se detectó la existencia de ciertas pautas de actividad relacionadas con cada inhalación: la pauta espacial de actividad era única para cada sujeto y, además, cambiaba de forma cada vez que se incorporaba la discriminación de un nuevo olor. La interpretación del

hallazgo fue que el contexto ambiental, las experiencias previas del sujeto, su estado atencional y de excitación, y sus expectativas (todos modelados como atractores caóticos) son algunas de las variables de las que depende la construcción del “significado” del estímulo mediante pautas espaciales de ordenamiento de las redes neuronales. Esto es así para las neuronas corticales (y no las periféricas) debido a las densas interacciones sinápticas con otras neuronas que generan en las primeras una continua actividad de trasfondo, esto es, conjuntos de señales eléctricas más débiles. Así, en contra de la hipótesis de que conductas particulares requieren la activación de módulos corticales determinados en etapas específicas de la conducta, Freeman defiende la idea de que la actividad de trasfondo, considerada tradicionalmente como ruido dendrítico, es una precondition necesaria para la ejecución de las conductas bajo estudio.

En esta línea, Freeman y Holmes (2005) han recientemente aportado elementos a favor de la tesis de un régimen metaestable en el cerebro, a partir del análisis de patrones espacio-temporales en el espectro 12-80 Hz del encefalograma. Anteriormente, Freeman y Barrie habían demostrado la propensión para la inestabilidad dinámica, manifestada en forma de rápidas transiciones del estado global en la actividad oscilatoria cortical. “La corteza opera al extraer covariancias débiles a lo largo de grandes poblaciones de neuronas con tasas de activación bajas” (Freeman y Barrie 1994: 18, mi traducción). La hipótesis es la de entender a los cerebros como órganos masivamente interactivos que se mantienen en estados metaestables que proveen tanto continuidad a largo plazo como la capacidad para transiciones rápidas.

La segunda línea de investigación que voy a presentar, el programa en dinámicas de la coordinación de Kelso, intenta identificar las variables coordinativas claves dentro de un sistema y describir sus dinámicas, entendidas como reglas que determinan la estabilidad y el cambio de los patrones coordinativos y el acoplamiento no lineal entre los componentes que generaron dichos patrones. Aplicado a las NC, el programa estudia las interacciones corticales en términos de principios generales propios de una gran cantidad de fenómenos cooperativos (descritos en el lenguaje de la TSD). Kelso, como Freeman, se apoya en el estudio de los potenciales de campo local pero se concentra en las relaciones entre las fases de oscilación entre regiones dispersas del cerebro como un prerequisite para un proceso dinámico de auto-organización de las redes neuronales.

La evidencia experimental para postular metaestabilidad en la corteza cerebral deriva de la observación de breves momentos de sincronía de fase interrumpidos por dispersión de fase (*phase wandering*). Por otra parte, modelos teóricos demuestran que la metaestabilidad surge como resultado de dos fuerzas complementarias: el acoplamiento entre congregaciones neuronales típicamente mediado por vías recíprocas en la corteza y la expresión de las propiedades biofísicas, típicamente oscilatorias y heterogéneas, intrínsecas a cada congregación neuronal (cfr., Engstrøm

y Kelso, 2008: 128-9). La metaestabilidad le permitiría al cerebro operar en un régimen intermedio entre la total estabilidad funcional, que no le otorgaría flexibilidad, y la plasticidad total, que no permitiría una organización funcional coherente.

Un sistema metaestable puede así manifestar un estado que es cuasi-estable y también puede flexiblemente pasar a otro estado cuasi-estable. De acuerdo con esto, las redes locales en una red neurocognitiva extendida imponen constricciones espaciotemporales una sobre otra por interacciones a gran escala y así se auto-organizan rápidamente en patrones distribuidos de actividad coordinada.

A grandes rasgos puede decirse que Freeman asume un enfoque más experimental, en el que los modelos están supeditados al análisis de los datos y la idea del cerebro metaestable es más bien un resultado de aquel; por su parte, Kelso asume un enfoque más teórico, en el que los modelos guían la experimentación y la metaestabilidad es más bien una heurística de búsqueda. Aun así, en su recorrido hacia la noción de metaestabilidad, ambos investigadores se apoyan extensivamente en las herramientas matemáticas, conceptuales y gráficas de la TSD, en tanto que especialmente aptas para la descripción de la evolución de sistemas complejos a lo largo del tiempo.

### **Criterios generales hacia un enfoque dinamicista en neurociencias cognitivas**

La noción de metaestabilidad así como algunos de los lineamientos generales de los programas de investigación revisados que desembocaron en ella manifiestan ciertos criterios subyacentes comunes.

En primer lugar, algunas consideraciones referentes a la metodología. En ambos programas se intenta articular una caracterización general de la dinámica cerebral a través de herramientas analíticas brindadas por la TSD. De acuerdo con la visión profundamente dinámica del cerebro que está actualmente detrás de buena parte de las neurociencias, los estados cerebrales se caracterizan por una complejidad y transitoriedad que vuelven sus propiedades invariantes especialmente difíciles de atacar. Dado esto, ambos programas asumen que el enfoque más provechoso para entender las dinámicas cerebrales es estudiar directamente su inestabilidad y transitoriedad: ponen así el foco en las dinámicas a gran escala y la variabilidad a lo largo del tiempo (incluso en períodos extendidos). El “holismo” que caracteriza a los programas presentados es de tipo metodológico y gira fundamentalmente alrededor de la aplicación extensiva del aparato matemático de la TSD.

En segundo lugar, pueden esbozarse algunos lineamientos comunes relativos al tipo de explicación perfilada. En términos generales, puede delinarse una transición desde un foco en estados hacia un foco en procesos. En particular, en el régimen metaestable ya no podría hablarse de “estados” del cerebro, sincronizados en fase y frecuencia, sino sólo en tendencias hacia la integración y hacia la segregación. En este sentido, la información (noción clave aunque poco

atendida en las ciencias cognitivas) tiende a pensarse en el nivel de las redes corticales a gran escala. En particular, la atención está puesta en sistemas auto-organizados no descomponibles, como lo muestra la siguiente hipótesis de Kelso: "Transmisiones reentrantes entre las áreas corticales de una red coordinada podrían así ser particularmente importantes para definir la expresión de información local en las áreas participantes" (Bressler y Kelso 2001: 33, mi traducción).

En general, parece difícil sostener bajo la hipótesis de la metaestabilidad una explicación vía estrategia analítica (esto es, por descomposición del proceso cognitivo y subsiguiente localización en el cerebro) por la que se daría cuenta del comportamiento del sistema en términos de la interacción causal de sus partes componentes. Van Orden *et al.* (2003) proponen una distinción útil para iluminar este punto, que justificaría una división de aguas entre dos maneras de abordar el estudio de sistemas complejos. la diferencia estriba en el supuesto, por un lado, de dinámicas dominadas por componente (*component-dominant dynamics*), donde las dinámicas intrínsecas de un componente dominan las interacciones con otros componentes (por ejemplo, Simon, 1973) y, por otro lado, el de trabajar con dinámicas dominadas por interacción (*interaction-dominant dynamics*), donde procesos vecinos cambian sus respectivas dinámicas en su interacción. Un régimen metaestable es, por definición, de este segundo tipo.

Pueden destacarse otros puntos importantes, estrechamente relacionados con la cuestión de la explicación, que abonan la idea de un enfoque dinamicista en NC. Afiora en los programas revisados cierto debilitamiento con respecto al asociacionismo (o, más generalmente, el marco estímulo-respuesta), enfoque estándar en las ciencias del comportamiento y del cerebro. para el caso de las NC esto se traduce comúnmente en la construcción de modelos expresados como ecuaciones diferenciales que describen un operador que transforma inputs en outputs. Ahora bien, un cerebro metaestable implicaría que las respuestas neuronales no co-varían linealmente con estímulos externos y que luego no puede asumirse una dependencia simple entre ambos. En este sentido, los inputs no especificarían un estado interno que describe algún estado de cosas externo sino que sirven como una fuente de perturbación en las dinámicas intrínsecas del sistema: los circuitos corticales no procesan simplemente información sensorial aferente sino que tienen un papel importante en la generación de la información que depende del estado cognitivo del agente, experiencias pasadas, expectativas, etcétera, tal como propone Freeman.

En relación con lo anterior, puede destacarse un tipo debilitado de representacionalismo subyacente. En lugar de buscar algún tipo de correspondencia (por ejemplo, entre el reporte subjetivo o la conducta y mediciones delimitadas a través de neuroimagen), se extraerán pistas significativas sobre los procesos cerebrales, por ejemplo, al seguir trayectorias del espacio de fase del cerebro en tiempo y espacio y, en general, al intentar caracterizar principios comunes de la organización neuronal a gran escala. Ni Freeman ni Kelso recurren al constructo de

representaciones en el cerebro, como es común en diferentes ámbitos de las neurociencias. Tómese por ejemplo el caso de la llamada neurociencia computacional, bajo una definición estándar, en la que la explicación de las transiciones de estado “describe los estados en términos de la información transformada, representada y almacenada” (Churchland, Koch y Sejnowski 1990: 48; mi traducción).

Con respecto al foco de ataque de los programas también existen elementos comunes: puntualmente, el problema de fondo que se ataca es el de la flexibilidad y adaptabilidad a circunstancias novedosas que el cerebro debe exhibir. Esto implica subrayar la importancia de las constricciones temporales de las tareas desempeñadas por el agente en tiempo real y en un ambiente dinámico cambiante. Este énfasis se traduce en el tratamiento de la dependencia respecto del contexto por parte del estado interno de un agente cognitivo situado y activo, que se correspondería con la actividad de trasfondo estudiada por Freeman. La hipótesis relativa a este punto compartida por ambos investigadores es que un régimen metaestable permitiría resolver el problema de la flexibilidad en tiempo real en cuanto que las redes neurocognitivas serían capaces de organizarse y reorganizarse rápidamente en diferentes patrones de coordinación.

Finalmente, en una proyección hacia la psicología cognitiva, se daría respaldo a la idea del solapamiento entre procesos perceptuales, cognitivos y motores o, dicho de otra manera, la idea de los sistemas perceptivo y motor como propiamente *cognitivos*: las instancias de percepción-cognición-acción son entendidas como procesos solapados unos con otros y que por ende requieren un tratamiento unificado (esto en neto contraste con el supuesto de segmentación de procesos cognitivos, moneda corriente en psicología cognitiva, y su subsiguiente localización en el cerebro). Ambos programas presentados tienden a enfatizar la descentralización y el comportamiento cooperativo entre muchos elementos en interacción, ejemplificado por el régimen metaestable, manifestando así una proyección interdisciplinar diferente respecto del estudio de fenómenos conductuales o cognitivos.

### Conclusión

El sentido más claro en que puede hablarse de un enfoque dinámico en NC radica en la prioridad otorgada al uso de la TSD para abordar los niveles mesoscópicos, de la formación de los patrones dinámicos a gran escala en el cerebro. La metaestabilidad constituye una hipótesis forjada y encarada por un abordaje de este tipo, y de ella puede desprenderse un conjunto de lineamientos teórico-metodológicos cohesivos y relativos a diversos aspectos de la investigación neurocientífica que sustentan la idea de un enfoque dinamicista. El insinuado alejamiento respecto de otras líneas en NC no puede ser fundamentado aquí, pero cabe aclarar que no se quiere plantear una oposición entre estilos de trabajo, donde claramente hay amplio espacio para la

compatibilidad. Puede aventurarse sin embargo que, en particular para el caso de las NC, la actual inundación de observaciones empíricas (favorecida también por el increíble avance reciente en las técnicas de neuroimagen) requiere un enfoque más global, "holista", que incorpore estas observaciones en una teoría más o menos coherente de la función cerebral, un marco que en fin pueda guiar la investigación. Lo que aquí se intentó mostrar es que un enfoque tal puede ser circunscrito mediante un conjunto distintivo de criterios epistemológicos.

## Notas

1 Esta es una de las ideas centrales por las que se entiende el trabajo de Ashby como exponente de la llamada cibernética de segundo orden (por ejemplo, Dupuy 2000). Ashby sufrió de la falta de métodos matemáticos y herramientas computacionales para implementar sus modelos pero puede con justicia considerarse un pionero en la tradición que aquí intento reconstruir.

2 Por razones de espacio, no puedo detenerme en las ideas aportadas por este físico teórico a la tradición de interés aquí.

## Bibliografía

- Abarbanel, H., Rabinovich, M. (2001) "Neurodynamics: Nonlinear Dynamics and Neurobiology", *Curr. Opin. Neurobiol.*, 11(4): 432-430
- Beer, Randall (2000) "Dynamical approaches in cognitive science", *Trends in Cognitive Sciences*, 4: 91-99
- Bressler, S., Kelso, S. (2001) "Cortical Coordination Dynamics and Cognition", *Trends in Cognitive Sciences*, 5(1): 26-36
- Churchland, P., Koch, C., Sejnowski, T. (1990) "What is Computational Neuroscience?", en Schwartz (ed.), *Computational Neuroscience*, MIT Press.
- Dupuy, J.P. (2000) *The Mechanization of the Mind*, Princeton University Press.
- Engström, D., Kelso, S. (2008) "Coordination Dynamics of the Complementary Nature", *Gestalt Theory*, 30(2): 121-134
- Fingelkurts, A., Fingelkurts, A. (2004), "Making Complexity Simpler", *Int. J. Neurosci.*, 114: 843-862.
- Freeman, W. (2005) "A Field-Theoretic Approach to Understanding Scale-Free Neocortical Dynamics", *Biological Cybernetics*, 92(6): 350-359
- Freeman, W., Barne, J. (1994) "Chaotic Oscillations and the Genesis of Meaning in Cerebral Cortex" en Mervillie y Christen (eds.), *Temporal Coding in the Brain*, Springer-Verlag.
- Freeman, W., Holmes, M. (2005) "Metastability, Instability, and State Transitions in Neocortex", *Neural Netw.*, 18(5-6): 497-504.
- Friston, K. (1997) "Transients, Metastability, and Neuronal Dynamics", *Neuroimage*, 5: 164-171
- Gardner, H. (1985) *La Nueva Ciencia de la Mente*, Paidós.
- Haken, H. (1986) "Synergetics", *Geoforum*, 16(2): 205-211
- Kelso, S. (1995) *Dynamic Patterns*, MIT Press.
- Le Van Quyen, M. (2003) "Disentangling the Dynamic Core", *Biol. Res.*, 36: 67-88.
- Liljenström, H., Svedin, U. (2005) *Micro, Meso, Macro*, World Scientific Printers.
- Nielsen, K. (2006) "Dynamical explanation in cognitive science", *Journal for General Philosophy of Science*, 37: 136-163.
- Pérez Velázquez, J. L. (2005) "Brain, Behaviour, and Mathematics", *Physica D*, 212: 161-182.

- Schöner, G., Kelso, S. (1988) "Dynamic Pattern Generation in Behavioral and Neural Systems", *Science*, 239. 1513-1520
- Simon, H (1973) "The Organization of Complex Systems", en Pattee (ed.), *Hierarchy Theory*, George Braziller
- Strogatz, S. (1994) *Nonlinear Dynamics and Chaos*, Addison-Wesley.
- Tononi, G., Sporns, O., Edelman, G (1994) "A measure for brain complexity", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 91. 5033-5037
- van Gelder, T., Port, R. (1995) "It's about time", en Port y van Gelder (eds), *Mind as Motion*, MIT Press.
- van Orden, G., Holden, J., Turvey, M. (2003) "Self-organization of cognitive performance", *Journal of Experimental Psychology*, 132: 331-350.
- Walmsley, J (2008) "Explanation in dynamical cognitive science", *Minds and Machines*, 18. 331-348.
- Werner, G. (2007) "Metastability, Criticality and Phase Transitions in Brain and its Models", *Biosystems*, 90: 496-508.