



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2025,
Volumen 9, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

UN MODELO DE INTERACCIÓN NO LINEAL PARA LA TOMA DE DECISIONES EN SISTEMAS DUALES

**A NONLINEAR INTERACTION MODEL FOR DUAL
SYSTEM DECISION-MAKING**

Carlos Ledesma-Alonso
Universidad Anáhuac Campus Norte

Un modelo de interacción no lineal para la toma de decisiones en sistemas duales

Carlos Ledesma-Alonso¹

carlos_ledesma@anahuac.mx

<https://orcid.org/0009-0005-3744-6422>

Estudiante de doctorado, Facultad de Bioética, Universidad Anáhuac Campus Norte
Estado de México, Huixquilucan

RESUMEN

Las teorías de la cognición de doble proceso, popularizadas por el psicólogo y ganador del premio Nobel en Economía Daniel Kahneman y su colaborador Amos Tversky, describen la toma de decisiones como la interacción entre un sistema rápido e intuitivo (sistema uno) y un sistema lento y deliberativo (sistema dos). A pesar de las grandes descripciones cualitativas, una simple formalización matemática de su interacción sigue siendo difícil de alcanzar. Por lo tanto, en este artículo, propongo un modelo algebraico novedoso que captura la sinergia no lineal entre estos dos sistemas a través de una identidad fundamental que involucra la diferencia de cuadrados centrada en su activación promedio. Esta formulación cuantifica el equilibrio cognitivo y la integración, mostrando que la toma de decisiones óptima surge de la participación estrecha y simétrica de ambos sistemas. El modelo ofrece un marco lento pero poderoso para simular la dinámica cognitiva, explicar las variaciones en la calidad de las decisiones y explorar los sesgos que surgen del dominio o la fatiga del sistema. Finalmente, discuto las posibles aplicaciones en neurociencia e inteligencia artificial, destacando la capacidad del modelo para unir la teoría cualitativa con la predicción cuantitativa.

Palabras clave: toma de decisiones, sistema dual, sesgo y ruido, interacción no lineal, inteligencia artificial

¹ Autor principal

Correspondencia: carlos_ledesma@anahuac.mx

A Nonlinear Interaction Model for Dual System Decision-Making

ABSTRACT

Theories of double-process cognition, popularized by psychologist and Nobel Prize winner in economics Daniel Kahneman and his collaborator Amos Tversky, describe decision-making as the interaction between a fast, intuitive system (system one) and a slow, deliberative system (system two). Despite the great qualitative descriptions, a simple mathematical formalization of their interaction remains elusive. Therefore, in this paper, I propose a novel algebraic model that captures the nonlinear synergy between these two systems through a fundamental identity involving the difference of squares centered on their average activation. This formulation quantifies cognitive equilibrium and integration, showing that optimal decision-making arises from the close and symmetrical participation of both systems. The model offers a slow but powerful framework for simulating cognitive dynamics, explaining variations in decision quality, and exploring biases arising from system dominance or fatigue. Finally, I discuss the possible applications in neuroscience and artificial intelligence, highlighting the model's ability to unite qualitative theory with quantitative prediction.

Keywords: decision making, dual system, bias and noise, nonlinear interaction, artificial intelligence

Artículo recibido 10 mayo 2025

Aceptado para publicación: 11 junio 2025



INTRODUCCIÓN

La toma de decisiones es un tema ampliamente debatido en el ámbito de las neurociencias, la psicología cognitiva, la economía y recientemente, ha adquirido un lugar especial con la llegada de la inteligencia artificial. Diariamente, los humanos tomamos decisiones sin necesariamente razonar o deliberar un pensamiento largo y agotador, es decir, son rápidas e intuitivas. De vez en cuando, nos topamos con un problema o dilema, en el que para tomar una decisión, se requiere de al menos tres componentes: tiempo, razonamiento deductivo y lógica. Todo esto en una concatenación de eventos que aunque determinados, son impredecibles.

El monumental trabajo del psicólogo y ganador del premio Nobel de Economía Daniel Kahneman y su colaborador Amos Tversky, explicó en gran parte la toma de decisiones y la relación que tiene ésta con la psicología cognitiva y la economía. De hecho, en su libro *Pensar Rápido y Despacio*, Kahneman explica el fenómeno de la toma de decisiones humanas y cómo afectan en la economía con una notable destreza (Kahneman, 2011). Además, demuestra que los humanos percibimos aversión a las pérdidas en función a los sentimientos involucrados en cierto tipo de tareas conductuales (McGraw et al., 2010).

Con respecto a los dos sistemas propuestos por Kahneman, el sistema uno genera intuiciones y operaciones automáticas que rara vez se atascan, y son inconscientes de la memoria asociativa; mientras que el sistema dos, es lento y consciente (Morewedge & Kahneman, 2010), es decir, mientras que el primero utiliza un método inductivo, el segundo usa uno deductivo. Cabe enfatizar que aunque el sistema uno, es prácticamente automático por su fácil accesibilidad, generalmente es exitoso (Kahneman, 2003). No obstante, no podemos tomar todas las decisiones de manera automática, se necesita de la deliberación razonada, es decir, asumir riesgos calculados y acotados. En adición, debemos de tomar en cuenta que los sesgos o el ruido estarán presentes en prácticamente todas las decisiones que tomemos (Kahneman et al., 2021).

Al respecto, las heurísticas son atajos, y por definición son de fácil acceso para tomar decisiones, sin embargo, a la larga resultan muchas veces en fallos o errores (Tversky & Kahneman, 1974), es por eso que en principio, un sistema dual de decisiones debe estar balanceado, que es el núcleo de la propuesta del artículo. El enfoque de este artículo es matemático, no necesariamente neurobiológico, aunque puede tener una interpretación neurocientífica aludiendo a algunas estructuras relacionadas con la toma de



decisiones. Como principio se utiliza el álgebra aplicada a un problema en neurociencia partiendo de una forma más de expresar un producto, pero considerando un eje simétrico o *punto de equilibrio cognitivo*.

DESARROLLO

Toma de decisiones: modelos matemáticos y redes neuronales

Algunos autores han categorizado los elementos básicos de la toma de decisiones, a saber, preferencias, opciones, selección y ejecución de la acción y la evaluación de los resultados (Ernst & Paulus, 2005). Nuestras preferencias dependen a su vez, de muchos factores, que el contexto confiere. Mediante técnicas de neuroimagen o estimulación magnética transcraneal, se han mapeado algunas estructuras involucradas en la toma de decisiones, siendo muy relevantes la corteza prefrontal, la corteza cingulada anterior o el sistema límbico (Rilling et al., 2008). En un contexto social, se han identificado sistemas de castigo y recompensa o la regulación emocional, como bases neuronales para decidir en un entorno enteramente social (Rilling & Sanfey, 2011). En términos de entrada y salida, el cerebro evalúa las entradas para responder con una salida. En ratones, se ha demostrado cómo los sistemas dopaminérgicos y gabaérgicos están estrechamente relacionados con la motivación y la recompensa en una tarea conductual de señal olfativa (Cohen et al., 2012), lo cual puede determinar la ulterior respuesta del ratón. Si restringimos un poco más la toma de decisiones, delimitándola con base en factores que confiere el contexto, podemos simplificar este fenómeno aún más. Un excelente modelo biológico es el gusano *C. elegans*. Dado que su circuitería neuronal está compuesta por 302 neuronas, la investigación en estos nemátodos ha resultado sustancial para el entendimiento de la toma de decisiones, incluso se ha analizado su cableado neuronal tomando en cuenta 279 neuronas y 2990 conexiones dirigidas (Varshney et al., 2011). A su vez, se han realizado múltiples experimentos que revelan las bases neurobiológicas con un enfoque matemático y de modelos computacionales de la toma de decisiones en *C. elegans*, en función a la exploración o la búsqueda de alimento (Haley et al., 2025; Haley & Chalasani, 2024). También se ha demostrado que durante una toma de decisiones perceptual, la acumulación de información sensorial es crucial para determinar una elección, analizado desde un punto de vista molecular y a su vez, matemático (Tanimoto & Kimura, 2019).



Las investigaciones realizadas en estos modelos biológicos, han develado que la toma de decisiones puede modelarse matemáticamente o incluso, simular modelos haciendo uso de redes neuronales. Se debe ser cauto al afirmar que la toma de decisiones se reduce a la matemática, ya que dicha aseveración sería falsa. Los modelos matemáticos con base algebraica son una herramienta para analizar y predecir una toma de decisiones, nada más. Hay que enfatizar que las interacciones lineales y no lineales pueden ayudar a vislumbrar fenómenos de causa y efecto. Esto no es nuevo, a finales de la década de los 90's, se propuso un modelo matemático para la toma de decisiones humana que constaba de seis etapas y utilizaba funciones polinomiales y una gran cantidad de variables (Bezerra et al., 1996). En la actualidad, las redes neuronales profundas de alta capacidad permiten analizar comportamientos cognitivos complejos y esto se ha probado en tareas conductuales de aprendizaje explicando y prediciendo ciertos patrones (Fintz et al., 2022).

Aplicaciones del marco dual: Sistemas uno y dos

Las aplicaciones de este marco dual de sistemas uno y dos, ha resultado útil en muchos campos, ya que se pueden analizar desde distintos enfoques. En medicina, se ha utilizado para medir la precisión de los médicos basados en el sistema uno y determinar si un paciente está enfermo o no, llegando a la conclusión de que, aunque la respuesta rápida tuvo un porcentaje alto (cerca del 80%), la conjugación de la experiencia y el razonamiento, da mejores resultados (Cabrera et al., 2015).

Por otro lado, se ha utilizado la Ley de Weber, quien describió la relación entre la magnitud física y la intensidad de un estímulo, para extraer los componentes neuronales dinámicos en la toma de decisiones (Deco et al., 2007), demostrando que un modelo de este tipo puede aplicarse para estudiar este fenómeno. Otro tipo de estudios en redes neuronales demuestran que en tareas cognitivas como planificar o tomar decisiones, que necesariamente contemplan la corteza prefrontal, y un sistema de dopaminérgico de recompensa, y dada la naturaleza de la tarea cierto grupo de neuronas se movilizan o se suprimen de manera selectiva (Dehaene et al., 1998; Dehaene & Changeux, 2000), mostrando así una especie de sinergia.

De hecho, en términos neuroanatómicos, se considera que la sede de la toma de decisiones en general es la corteza prefrontal (Sakagami & Pan, 2007), esto ha sido demostrado indirectamente cuando esta estructura no funciona adecuadamente en un individuo (Anderson et al., 1999; Bramham et al., 2009;



Manes et al., 2002). Cabe resaltar que hay cuatro teorías de integración de sistemas de decisión (pavlovianos, deliberativos y procedimentales) que intentan explicar cómo se toma la decisión con la influencia de estos tres sistemas cognitivos (McLaughlin et al., 2021).

Cuantificando la interacción no lineal entre intuición y razonamiento: una propuesta basada en una identidad algebraica

En la búsqueda por formalizar la interacción entre los dos sistemas de toma de decisiones propuestos por Kahneman presento una ecuación sencilla pero potente que describe la sinergia entre ambos. Esta ecuación se basa en una identidad algebraica hasta ahora nada explorada en el campo cognitivo:

$$D(x, y) = \left(\frac{x + y}{2}\right)^2 - \left[\frac{x + y}{2} - x\right]^2 = xy$$

Ecuación 1. Identidad matemática donde x, y representan las activaciones respectivas de los sistemas 1 y 2, y $D(x, y)$ el resultado de su interacción en la decisión final. Si uno de los sistemas está colapsado ($x = 0$ o $y = 0$) la interacción desaparece $D=0$. El equilibrio entre x y y , maximiza el valor: si $x = y$ entonces $D = x^2$.

La ecuación 1 no es más que una forma de expresar el producto de xy . Es una identidad, pero que resulta tener aplicaciones dada su manera inusual de expresarse. La idea fue dada debido a que si sustituimos tanto x como y como productos del sistema uno (respuesta) y dos (estímulo) respectivamente, se produce una *sinergia cognitiva*, esto es, la efectividad aumenta cuando ambos sistemas están activamente involucrados en la toma de decisión.

Esta igualdad no es solo una curiosidad matemática, sino que refleja una idea intuitiva: la decisión óptima surge cuando ambos sistemas trabajan en equilibrio, es decir, cuando sus activaciones son similares y se potencian mutuamente. Si uno domina claramente al otro, el valor resultante disminuye, mostrando cómo el desequilibrio puede reducir la calidad o efectividad de la decisión.

En otras palabras, esta identidad permite cuantificar la interacción no lineal, la sinergia (en este caso cognitiva) que es difícil de capturar con funciones lineales simples. Esto es fundamental porque la toma de decisiones humana rara vez es una suma directa de intuición y razonamiento; más bien, es una combinación compleja donde ambos sistemas influyen y modulan el resultado (Morewedge & Kahneman, 2010). A diferencia de otras formas algebraicamente equivalentes del producto, esta

expresión incorpora de manera natural el promedio entre los dos sistemas como eje de referencia, y traduce su interacción en una desviación respecto a ese punto de equilibrio compartido. Así, la decisión deja de representarse como una mera suma de impulsos y argumentos, para entenderse como el resultado emergente de una interacción no lineal cuyo centro es el balance cognitivo. El valor distintivo de esta formulación no radica solo en su validez matemática, sino en que su estructura refleja con notable fidelidad la geometría interna del modelo dual, cosa que otras expresiones no logran capturar con igual elegancia ni pertinencia teórica.

Extensiones del modelo matemático

Para capturar mejor la diversidad y complejidad de la toma de decisiones humana basado en una ecuación, a saber, ecuación 1, propongo dos extensiones de ésta que son simples y lógicas. Mientras que la primera ecuación **(2)** modela cómo los sistemas se combinan; la segunda **(3)** dictamina cómo se degradan.

Asimetría en la cooperación entre dos sistemas

Introduce un parámetro α , que permite modelar la preferencia o el peso que un individuo otorga al sistema uno frente al sistema dos:

$$D\alpha(x, y) = \left(\frac{\alpha x + (1 - \alpha)y}{2} \right)^2 - \left(\frac{\alpha x + (1 - \alpha)y}{2} - x \right)^2$$

Ecuación 2. Donde x es la activación del sistema 1 (intuición), y es la activación del sistema 2 (razonamiento) y $\alpha \in [0, 1.0]$ representa el sesgo hacia la intuición.

La ecuación 2 se puede interpretar del siguiente modo: mientras más alto sea el valor de α , el individuo tenderá a actuar por instinto, mientras que si tiende a 0 sus decisiones serán más razonables. Así este modelo permite afectar la decisión en función al sesgo.

Ruido o fatiga cognitiva

En la vida cotidiana, el sistema dos suele estar sujeto a factores de energía y tiempo, por lo tanto, es lógico pensar que pueda llegar a fatigarse (colapsarse) y lo que implica es que toda decisión sería tomada desde la emoción. Esto también se puede representar de manera clara en una ecuación, deducida de manera lógica de la Ecuación 1, partiendo de la interacción entre ambos sistemas.

$$D(x, y, f) = x \cdot y \cdot (1 - f)$$



Ecuación 3. Donde x, y son activaciones de los sistemas 1 y 2. $f \in [0,1.0]$ representará el nivel de fatiga cognitiva, donde 0 es alerta total y 1 es colapso absoluto.

La incorporación de una variable de fatiga cognitiva (f) surge como una extensión lógica del modelo propuesto, donde la interacción entre intuición y razonamiento se ve modulada por la carga mental o el agotamiento. Aunque la formulación explícita $x \cdot y \cdot (1 - f)$ fue sistematizada posteriormente, su fundamento conceptual está implícito en la estructura original de la ecuación y en el enfoque cognitivo que la sustenta.

Simulación de ambas extensiones

- Un joven decide si defender en público a una persona criticada injustamente. Su intuición le sugiere no intervenir ($x = 0.3$, miedo inmediato). Su razonamiento ético indica que debe hablar ($y = 0.9$, valor moral) Si asignamos valores:

- $x = 0.3$ (miedo o temor)
- $y = 0.9$ (valor moral)

Tabla 1. Valor de la función asimétrica $D\alpha(x, y)$ con $x = 0.3$, $y = 0.9$, para diferentes valores de α , que representa el peso del sistema uno. A medida que aumenta α , la decisión se inclina hacia el impulso emocional, reduciendo el impacto del razonamiento ético. La fórmula permite visualizar cómo la ponderación entre sistemas modifica la salida decisional sin necesidad de introducir variables externas. Analicemos brevemente un ejemplo con la fatiga o ruido utilizando la ecuación 3.

A	Individuo	$D\alpha(x, y)$	Interpretación
0.2	Muy racional	0.486	La razón predomina; decide intervenir pese a su valor emocional
0.5	Equilibrado	0.315	Indecisión; la tensión entre temor y deber es máxima
0.8	Muy impulsivo	0.126	La emoción de autoprotección predomina; decide no intervenir
1.0	Intuición pura	0	No hay intervención racional; interviene por mero impulso

- Un médico que ha trabajado durante 10 horas seguidas se enfrenta a una situación compleja: debe decidir si reporta o no una falta menor cometida por un colega que podría ponerlo en riesgo laboral, pero que no ha tenido consecuencias graves.

Asignemos valores:



- $x=0.6$ el sistema uno le insta proteger al colega (impulso por empatía).
- $y=0.8$ el sistema dos dictamina que lo correcto es reportar el hecho (juicio racional).

Tabla 2. Efecto de la fatiga cognitiva (f) en la interacción entre intuición ($x=0.6$) y razonamiento moral ($y=0.8$). El modelo muestra cómo el deterioro del sistema 1 reduce la calidad de la decisión, favoreciendo la respuesta automática.

Nivel de Estado mental	Valor de D	Interpretación breve
ruido	(x, y, f)	
0.0	Estado óptimo, mente clara	0.48
		Evaluación moral equilibrada; ambos sistemas cooperan.
0.3	Cansancio moderado	0.336
		Se reduce la influencia del juicio racional.
0.6	Fatiga significativa	0.192
		El razonamiento pierde fuerza; domina el impulso.
1.0	Colapso cognitivo, saturación mental	0.0
		No hay cooperación: se actúa automáticamente o se evita decidir.

Un hecho que podemos deducir de ambas ecuaciones es que los sistemas cognitivos raramente actúan en perfecto equilibrio, ya que tendrían siempre la máxima eficiencia. En consecuencia y con respecto de lo que argumenta Kahneman, tanto el sesgo como el ruido, son dos factores que están presentes en la toma de decisiones humana. Las ecuaciones presentadas sólo son una forma de manifestar incluso geométricamente, cómo el eje de simetría puede determinar el equilibrio de ambos sistemas.

DISCUSIÓN

Este modelo de interacción no lineal ($D(x, y) = \left(\frac{x+y}{2}\right)^2 - \left[\frac{x+y}{2} - x\right]^2 = xy$) tiene como objetivo representar si en un contexto donde se debe tomar una decisión, la elección fuera una figura mental que se construye a partir del promedio entre dos sistemas, pero cuyo valor real depende de cuánto se aleja uno de ellos del centro de equilibrio y justo ese valor, determina *hacia donde* se toma la decisión. En términos biológicos, una posible explicación que puede meter ruido es la hipótesis del marcador somático de Damasio, que afirma que tenemos biorreguladores somáticos que determinan nuestro estado

mental, influyendo en la corteza prefrontal (Damasio, 1996), esto implica que hay una *carga emocional* en función a cómo nos sentimos.

En adición, existen una buena cantidad de sesgos (disponibilidad, confirmación, disposición, etc.) que influyen en nuestras elecciones y muchas veces proceden a errores sistemáticos y en la literatura especializada hay un artículo que compiló un gran número de trabajos relacionados con el sesgo y toma decisiones y el impacto que tienen éstos, en distintas áreas como finanzas, medicina o administración (Berthet, 2022). Estudios que incluyen modelos como la Teoría de Detección de Señales o de Acumulación de Evidencia ayudan a comprender cómo el sesgo influye en las decisiones (Cerracchio et al., 2023). El interés por los sesgos y las heurísticas ha crecido exponencialmente, y sus resultados son prometedores ya que se acercan a comprender el cómo y el porqué de la toma de decisiones.

Una de las cuatro teorías para la toma de decisiones basada en sistemas, apuesta por tres los sistemas de decisión (citados en la sección 3) podrían operar en una estructura jerárquica a través de evidencia acumulada (McLaughlin et al., 2021). No obstante, en el presente trabajo se habla de la interacción entre dos sistemas, no tres.

Por otro lado, mientras que los modelos de tipo bayesiano de inferencia tratan la toma de decisiones como una actualización racional de creencias (Tenenbaum et al., 2006) la formulación aquí expuesta enfatiza cómo esa racionalidad puede verse sesgada por la activación diferencial de dos sistemas con *pesos* distintos, permitiendo una cuantificación explícita del desequilibrio. Otro modelo relevante para comprender cómo se toman las decisiones en un modelo computacional denominado Drift Diffusion Model, que se define mediante una serie de ecuaciones matemáticas que contienen diversos parámetros y estos pueden adquirir ciertos valores, y modela cómo la evidencia se acumula hasta un umbral para tomar una decisión (Myers et al., 2022), no obstante, mi formulación está enfocada en una sinergia, lo cual significa que incorpora una interacción simultánea, mas no secuencial.

Finalmente, es importante distinguir el enfoque del estudio; mientras que unos se encargan de predecir un comportamiento mediante un modelo matemático; otros, intentan comprender el cómo se tomó la decisión. De ahí que el modelo propuesto, se adapte un poco a ambos enfoques. Hasta el momento, no hay evidencia en la literatura, que se haya utilizado una identidad algebraica sencilla para reflejar la dinámica cognitiva de dos sistemas, a saber, el uno y el dos propuestos de Kahneman. No obstante, sí

existen trabajos que se ayudan del álgebra para explicar fenómenos en neurociencia (Curto et al., 2015; Steffener et al., 2016). En consecuencia, la identidad algebraica que propuse es una interacción no lineal, donde el promedio que representa la simetría y la desviación (la asimetría) explica cómo dos sistemas, a saber el uno y el dos (el intuitivo y el racional, respectivamente) interactúan y esto no depende de su suma o producto sino de su relación simétrica/asimétrica respecto a un punto central compartido: el promedio. Esto permite de alguna manera visualizar geoméricamente, que una toma de decisiones basada en estos dos sistemas, puede desplazarse en función a un sesgo o un ruido (extensiones del modelo), y que su forma óptima o eficiente es cuando están en equilibrio. Dicha forma algebraica puede utilizarse en muchas áreas, desde la economía, por ej. para entender la dinámica entre dos sistemas, o en psicología cognitiva, analizando y prediciendo sesgos, o incluso en dilemas éticos, observando cómo pequeñas afectaciones en la toma de decisiones determinan la elección moral.

CONCLUSIÓN

En este trabajo propongo una interpretación algebraica original de la interacción entre dos sistemas cognitivos —rápido e intuitivo (sistema uno), y lento y deliberativo (sistema dos)— mediante una identidad matemática que estructura su relación a partir de un eje de simetría común. A diferencia de otros enfoques lineales o acumulativos, la ecuación aquí presentada introduce una dinámica no lineal que incorpora explícitamente la desviación respecto al equilibrio como un componente esencial del resultado. Las extensiones desarrolladas sobre sesgo cognitivo y fatiga mental demuestran cómo pequeñas alteraciones en la simetría o intensidad de los sistemas afectan significativamente el proceso de decisión. Así, la presente propuesta no solo formaliza la teoría dual del trabajo de Kahneman y Tversky desde un marco matemático accesible, sino que abre un campo de análisis más profundo sobre cómo se configura cognitivamente el juicio humano. Este modelo puede servir como base para futuras aplicaciones en economía o neurociencia cognitiva que contengan sistemas de tipo dual.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, S. W., Bechara, A., Damasio, H., Tranel, D., & Damasio, A. R. (1999). Impairment of social and moral behavior related to early damage in human prefrontal cortex. *Nature Neuroscience*, 2(11), 1032–1037. <https://doi.org/10.1038/14833>
- Berthet, V. (2022). The Impact of Cognitive Biases on Professionals' Decision-Making: A Review of Four Occupational Areas. *Frontiers in Psychology*, 12, 802439. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.802439>
- Bezerra, S., Cherruault, Y., Fourcade, J., & Veron, G. (1996). A mathematical model for the human decision-making process. *Mathematical and Computer Modelling*, 24(10), 21–26. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(96\)00161-6](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(96)00161-6)
- Bramham, J., Morris, R. G., Hornak, J., Bullock, P., & Polkey, C. E. (2009). Social and emotional functioning following bilateral and unilateral neurosurgical prefrontal cortex lesions. *Journal of Neuropsychology*, 3(Pt 1), 125–143. <https://doi.org/10.1348/174866408X293994>
- Cabrera, D., Thomas, J. F., Wiswell, J. L., Walston, J. M., Anderson, J. R., Hess, E. P., & Bellolio, M. F. (2015). Accuracy of 'My Gut Feeling:' Comparing System 1 to System 2 Decision-Making for Acuity Prediction, Disposition and Diagnosis in an Academic Emergency Department. *Western Journal of Emergency Medicine*, 16(5), 653–657. <https://doi.org/10.5811/westjem.2015.5.25301>
- Cerracchio, E., Miletić, S., & Forstmann, B. U. (2023). Modelling decision-making biases. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 17. <https://doi.org/10.3389/fncom.2023.1222924>
- Cohen, J. Y., Haesler, S., Vong, L., Lowell, B. B., & Uchida, N. (2012). Neuron-type specific signals for reward and punishment in the ventral tegmental area. *Nature*, 482(7383), 85–88. <https://doi.org/10.1038/nature10754>
- Curto, C., Itskov, V., Veliz-Cuba, A., & Youngs, N. (2015). *The neural ring: An algebraic tool for analyzing the intrinsic structure of neural codes* (No. arXiv:1212.4201). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1212.4201>



- Damasio, A. R. (1996). The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 351(1346), 1413–1420. <https://doi.org/10.1098/rstb.1996.0125>
- Deco, G., Scarano, L., & Soto-Faraco, S. (2007). Weber's Law in Decision Making: Integrating Behavioral Data in Humans with a Neurophysiological Model. *The Journal of Neuroscience*, 27(42), 11192–11200. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1072-07.2007>
- Dehaene, S., & Changeux, J. P. (2000). Reward-dependent learning in neuronal networks for planning and decision making. *Progress in Brain Research*, 126, 217–229. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(00\)26016-0](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(00)26016-0)
- Dehaene, S., Kerszberg, M., & Changeux, J.-P. (1998). A neuronal model of a global workspace in effortful cognitive tasks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(24), 14529–14534. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.24.14529>
- Ernst, M., & Paulus, M. P. (2005). Neurobiology of decision making: A selective review from a neurocognitive and clinical perspective. *Biological Psychiatry*, 58(8), 597–604. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2005.06.004>
- Fintz, M., Osadchy, M., & Hertz, U. (2022). Using deep learning to predict human decisions and using cognitive models to explain deep learning models. *Scientific Reports*, 12(1), 4736. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08863-0>
- Haley, J. A., & Chalasani, S. H. (2024). C. elegans foraging as a model for understanding the neuronal basis of decision-making. *Cellular and Molecular Life Sciences: CMLS*, 81(1), 252. <https://doi.org/10.1007/s00018-024-05223-1>
- Haley, J. A., Chen, T., Aoi, M., & Chalasani, S. H. (2025). Accept-reject decision-making revealed via a quantitative and ethological study of C. elegans foraging. *eLife*, 13. <https://doi.org/10.7554/eLife.103191.2>
- Kahneman, D. (2003). A perspective on judgment and choice: Mapping bounded rationality. *The American Psychologist*, 58(9), 697–720. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.58.9.697>
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, Fast and Slow*. Farrar, Straus and Giroux.
- Kahneman, D., Sibony, O., & Sunstein, C. R. (2021). *Noise: A Flaw in Human Judgment*. Little, Brown.



- Manes, F., Sahakian, B., Clark, L., Rogers, R., Antoun, N., Aitken, M., & Robbins, T. (2002). Decision-making processes following damage to the prefrontal cortex. *Brain: A Journal of Neurology*, 125(Pt 3), 624–639. <https://doi.org/10.1093/brain/awf049>
- McGraw, A. P., Larsen, J. T., Kahneman, D., & Schkade, D. (2010). Comparing gains and losses. *Psychological Science*, 21(10), 1438–1445. <https://doi.org/10.1177/0956797610381504>
- McLaughlin, A. E., Diehl, G. W., & Redish, A. D. (2021). Potential roles of the rodent medial prefrontal cortex in conflict resolution between multiple decision-making systems. *International Review of Neurobiology*, 158, 249–281. <https://doi.org/10.1016/bs.irn.2020.11.009>
- Morewedge, C. K., & Kahneman, D. (2010). Associative Processes in Intuitive Judgment. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(10), 435–440. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.07.004>
- Myers, C. E., Interian, A., & Moustafa, A. A. (2022). A practical introduction to using the drift diffusion model of decision-making in cognitive psychology, neuroscience, and health sciences. *Frontiers in Psychology*, 13, 1039172. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.1039172>
- Rilling, J. K., King-Casas, B., & Sanfey, A. G. (2008). The neurobiology of social decision-making. *Current Opinion in Neurobiology*, 18(2), 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2008.06.003>
- Rilling, J. K., & Sanfey, A. G. (2011). The neuroscience of social decision-making. *Annual Review of Psychology*, 62, 23–48. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.121208.131647>
- Sakagami, M., & Pan, X. (2007). Functional role of the ventrolateral prefrontal cortex in decision making. *Current Opinion in Neurobiology*, 17(2), 228–233. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.02.008>
- Steffener, J., Li, K., Alain, S., & Frasnelli, J. (2016). *Quantifying Neural Efficiency and Capacity: A Differential Equation Interpretation of Polynomial Contrasts* (No. arXiv:1606.06249). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.06249>
- Tanimoto, Y., & Kimura, K. D. (2019). Neuronal, mathematical, and molecular bases of perceptual decision-making in *C. elegans*. *Neuroscience Research*, 140, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.neures.2018.10.010>



- Tenenbaum, J. B., Griffiths, T. L., & Kemp, C. (2006). Theory-based Bayesian models of inductive learning and reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(7), 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.05.009>
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. *Science*, 185(4157), 1124–1131. <https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>
- 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1001066>

