

LA CREACIÓN MATEMÁTICA Y EL CEREBRO HUMANO: PREGUNTAS INTRIGANTES QUE LAS NEUROCIENCIAS COMIENZAN A RESPONDER

Pedro A. WILLGING

*Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad Nacional de La Pampa
Uruguay 151 - (6300) Santa Rosa - La Pampa - Argentina
pwillging@gmail.com*

RESUMEN

¿Cómo hace nuestro cerebro para codificar $2+1=3$? ¿Por qué encontramos las multiplicaciones por 7, 8, o 9 particularmente difícil? ¿Por qué no puedo reconocer más de 4 objetos con una sola mirada? ¿Qué trucos les permiten a algunos “genios” multiplicar dos números de 3 dígitos en unos pocos segundos?

Si bien los historiadores de la ciencia y filósofos de la matemática han provisto algunas respuestas tentativas, para la mente científica, el carácter especulativo y contingente de las mismas es insatisfactorio. Recientemente, varios descubrimientos científicos han comenzado a revelar el modo en el que el cerebro realiza cálculos matemáticos. Utilizando ingeniosos experimentos con animales, bebés, pacientes con lesiones cerebrales, y herramientas de mapeo cerebral de última generación, equipos multidisciplinarios de investigadores han llegado a una sorprendente conclusión: la Evolución nos ha legado una habilidad innata para la aritmética, una intuición de las cantidades numéricas que combinadas con nuestra capacidad humana única para el lenguaje, nos da una habilidad inigualable para crear matemática.

El avance de la tecnología de imágenes ha producido instrumental que permite visualizar los circuitos activos del cerebro humano a medida que calcula y resuelve problemas aritméticos. Un nuevo campo científico ha nacido: matemática cognitiva, o la búsqueda científica acerca del modo en el que el cerebro da origen a la matemática. En esta presentación se provee una primera mirada a este nuevo campo de investigación que varios científicos alrededor del mundo están aun ocupados en desarrollar. Los aportes vienen de diferentes campos: neuropsicología, psicolingüística, psicología cognitiva, neurobiología, y mapeo de imágenes cerebrales entre otros. Este es un enigmático tour destinado a conocer como la estructura del cerebro modela nuestras habilidades matemáticas, y como nuestras matemáticas abren una ventana a la mente humana.

NEUROPSICOLOGÍA: EL ORIGEN DE LA MATEMÁTICA COGNITIVA

La matemática cognitiva es una especialización muy nueva que surge a partir de los avances dentro de un campo de investigación más amplio que es la neuropsicología. La Neuropsicología es una disciplina fundamentalmente clínica, que converge entre la Psicología y la Neurología y que estudia los efectos de una lesión, daño o funcionamiento anómalo en las estructuras del sistema nervioso central sobre los procesos cognitivos, psicológicos, emocionales y del comportamiento individual. Estas disfunciones pueden estar provocadas por traumatismos craneoencefálicos, accidentes cerebro-vasculares, tumores cerebrales, enfermedades neurodegenerativas (Alzheimer, esclerosis múltiple, Parkinson) o enfermedades del desarrollo (epilepsia, parálisis cerebral, trastorno por déficit de atención/hiperactividad).

La Neuropsicología tiene su origen en los trabajos de varios psicólogos y médicos en los siglos XIX y XX, es una rama interdisciplinaria de la psicología y la neurociencia que apunta a entender como la estructura y funcionamiento del cerebro se relaciona a procesos y comportamientos psicológicos específicos. El termino neuropsicología ha sido aplicado a estudios de lesiones de humanos y animales y también a los esfuerzos de registrar actividad eléctrica de células individuales (o grupos de células) en primates (incluyendo algunos estudios de pacientes humanos) (Posner & DiGirolamo, 2000).

La neuropsicología es una de las disciplinas psicológicas mas eclécticas, solapándose a veces con áreas tales como neurociencia, filosofía (particularmente la filosofía de la mente), neurología, psiquiatría y ciencias de la computación (particularmente haciendo uso de redes neuronales artificiales). La neuropsicología experimental trata de descubrir la relación entre el sistema nervioso y las funciones cognitivas. Se estudian seres humanos o animales para descubrir por ejemplo que la información visual presentada en un campo visual específico es procesada por el hemisferio cortical del lado opuesto.

La neuropsicología clínica trata con pacientes que han sufrido algún daño que puede afectar las funciones cerebrales. La neuropsicología cognitiva es un desarrollo relativamente nuevo que surge como la destilación de las aproximaciones experimental y clínica de la neuropsicología. Trata de entender la mente y el cerebro estudiando personas que han sufrido daños cerebrales o enfermedades neurológicas.

Un modelo de funcionamiento neuropsicológico se conoce como localización funcional. Este se basa en el principio de que si un problema cognitivo específico aparece después de una lesión en un área específica del cerebro, es posible que esa parte del cerebro esté involucrada de algún modo. Pero hay razones para pensar que la relación entre funciones mentales y regiones neuronales no es tan simple. Un modelo alternativo, como el procesamiento paralelo, podría tener mas poder explicativo para el funcionamiento y disfunciones del cerebro. Una aproximación mas reciente es la neuropsiquiatría cognitiva que busca entender la función normal de la mente y el cerebro estudiando enfermedades psiquiátricas o mentales.

El conexionismo es el uso de redes neuronales artificiales para modelar procesos cognitivos específicos usando lo que son considerados modelos simplificados pero plausibles de cómo operan las neuronas. Una vez entrenadas para efectuar tareas cognitivas específicas esas redes a veces son “dañadas o lesionadas” para simular lesiones cerebrales o deficiencias en un intento de entender y comparar los resultados con los efectos de lesiones al cerebro en humanos.

Las técnicas de neuroimagen funcional utilizan tecnologías para tomar lecturas del cerebro, generalmente cuando una persona esta realizando una tarea particular, en un intento de entender como la activación de áreas particulares del cerebro se relacionan a esa tarea. En particular el avance de metodologías para empleo de test cognitivos dentro de técnicas establecidas de resonancia magnética para estudiar relaciones de cerebro-comportamiento está teniendo una influencia notable en la investigación neuropsicológica.

Dentro de las herramientas para recolección de datos de los neuropsicólogos, están los test neuropsicológicos estandarizados, tales como los test de inteligencia o memoria, los de retención visual, o el de asociación de palabras. Otras herramientas más sofisticadas son los escaneos del cerebro, que incluyen la Tomografía por Emisión de Positrones, las Imágenes por Resonancia Magnética y las mediciones electrofisiológicas que se obtienen por medio de ElectroEncefalogramas o MagnetoEncefalogramas.

Evolución de los estudios neurológicos

Uno de los problemas médicos motivadores de la investigación neuropsicológica fue la afasia, que es la una disfunción en los circuitos del cerebro que imposibilita o disminuye la capacidad de comunicarse mediante el lenguaje oral, la escritura o los símbolos cuando se conserva el entendimiento y los órganos del habla. En 1861, el antropólogo francés Pierre Paul Broca declaró la localización del centro del lenguaje (al cual se le conoce hoy en día como "Área de

Broca"), ubicándolo en la tercera circunvolución frontal del hemisferio izquierdo. Este descubrimiento fue vital para establecer una clasificación del síndrome de la afasia. Antes que Broca, el médico Marc Dax había descrito un caso de parálisis derecha asociada a afasia, que él relacionó con un daño cerebral por accidente cerebro-vascular en el hemisferio izquierdo. En 1874 el médico alemán Carl Wernicke describe otro tipo de síndrome afásico, que se da por una lesión temporal-parietal izquierda. En ella la comprensión es lo más alterado, siendo la fluencia normal. Sin embargo el contenido del lenguaje de estos pacientes también está alterado en la forma que a veces se ha denominado "ensalada de palabras" (las palabras están bien pronunciadas pero su contenido solo se ajusta parcialmente a la gramática y objetivo comunicativo del sujeto).

Los estudios de Broca fueron motivados en parte también por Franz Joseph Gall, el creador de la frenología en 1802. La frenología consideraba que existían funciones mentales con una localización diferenciada en el cerebro. Actualmente esta disciplina está considerada una pseudociencia porque su clasificación y localización de las funciones mentales no se basaba en ningún tipo de evidencia científica. La frenología fue criticada, entre otros por Marie-Jean Pierre Flourens, un fisiólogo francés que creía que era imposible localizar las funciones cerebrales con precisión, ya que las diferentes estructuras cerebrales interactuaban entre sí creando sistemas funcionales.

El debate iniciado por Gall y Flourens entre localizacionismo y funcionalismo ha perdurado hasta la actualidad y forma parte de la neuropsicología en vigencia.

Más recientemente, el psicólogo y médico ruso Alexander Romanovich Luria ha perfeccionado diversas técnicas para estudiar el comportamiento de personas con lesiones del sistema nervioso, y completó una batería de pruebas psicológicas diseñadas para establecer las afecciones en los procesos psicológicos: atención, memoria, lenguaje, praxias, gnosias, y cálculo entre otras. La aplicación de estas pruebas podía darle al neurólogo una clara idea de la ubicación y extensión de la lesión, y al mismo tiempo, al psicólogo le proporcionaba un reporte detallado de las dificultades cognoscitivas del paciente.

Las Guerras Mundiales del siglo XX proporcionaron a la Medicina y a la Psicología oportunidades trágicas, pero importantes, para estudiar la función cerebral. La observación y medición del comportamiento de pacientes con diversos traumatismos sufridos durante el combate permitió establecer las áreas del cerebro que se ocupan de las diversas manifestaciones de comportamiento. Las heridas de guerra (normalmente por bala o metralla) permitían estudiar con una precisión imposible hasta ese momento la relación entre localización y función. También se utilizaron métodos más cruentos, como producir intencionalmente lesiones en animales para observar los cambios en el comportamiento y establecer paralelos con los seres humanos.

En la actualidad la Neuropsicología se vale de los estudios de imágenes del cerebro y de las ciencias cognitivas para diseñar esquemas de funcionamiento y de rehabilitación de las funciones dañadas o perdidas. Estos instrumentos exploran con profundidad las diversas funciones cognitivas y rinden un informe del estado en que se encuentran.

Algunos descubrimientos notables de la neuropsicología relacionados con la Matemática

Utilizando avanzadas tecnologías y procedimientos ingeniosos, en los últimos años se han obtenido sorprendentes descubrimientos relacionados al modo en el que el cerebro procesa el pensamiento matemático.

Muchos experimentos demuestran que la habilidad de distinguir cantidades y realizar cálculos elementales es inherente en bebés humanos, y aun en varios animales, como pájaros, ratas, o monos. Nieder et. al. (2002) descubrieron que los monos macacos tienen neuronas codificadoras de números en la corteza prefrontal lateral del cerebro. Estudios con pacientes que sufrieron ataques cerebrovasculares y perdieron su habilidad matemática indican que funciones matemáticas claves residen en el lóbulo parietal izquierdo del cerebro.

Tanto el ser humano como los animales poseen un “acumulador” numérico en su cerebro, legado de la Evolución, que les permite realizar estas operaciones matemáticas simples. Las ratas explotan este acumulador mental para distinguir series de 2, 3, o 4 sonidos o para computar sumas aproximadas de dos cantidades. También está registrado en numerosos experimentos que cuando animales y humanos son confrontados con la tarea de comparar dos cantidades numéricas para decidir cual de ellas es mayor, el tiempo de reacción y precisión en las operaciones está sistemáticamente influenciado por la distancia numérica entre los dos valores (el efecto distancia) y el valor numérico (el efecto tamaño). El tiempo de reacción es mayor y la precisión menor para los valores que son similares en valor numérico (e.g. 6 y 7) que para valores que están más separados en valor (e.g., 2 y 7). Cuando la distancia se mantiene igual, la precisión disminuye y la demora en responder aumenta a medida que el tamaño de los valores que se comparan aumenta (e.g., comparar 3 y 5 contra comparar 65 y 67).

Ingeniosos experimentos demuestran que los bebés humanos, ya saben desde el nacimiento algunos fragmentos de aritmética comparable al conocimiento matemático de los animales. Del mismo modo que sabemos que el color de un objeto es rojo (o verde o lo que sea) con solo verlo, los humanos –desde la cuna- sabemos, solo con verlos que si se nos presentan tres objetos, ellos son tres. Esto contradice la teoría de Jean Piaget, quien negaba a los niños pequeños toda habilidad numérica.

Las tomografías computadas muestran que cuando nuestro cerebro se ve confrontado con una tarea para la cual no fue preparado por la evolución, tal como la multiplicación de dos dígitos, recluta una vasta red de áreas cerebrales para llevarla a cabo.

Respecto de la razón por la cual brillantes matemáticos como Gauss, Einstein, o Ramanujan han alcanzado tan extraordinaria familiaridad con los objetos matemáticos y si tenemos que suponer que algunas personas inician sus vidas con una arquitectura cerebral particular o una predisposición biológica a convertirse en genios, la Neuropsicología también tiene algunas respuestas. Hasta el presente, existe muy poca evidencia de que grandes matemáticos y calculadores prodigiosos han heredado una estructura neurobiológica excepcional. Igual que el resto de nosotros, los expertos en aritmética tienen que pelear con largos cálculos y complejos conceptos matemáticos. Si tienen éxito, es solo porque le dedican un tiempo considerable a este tema y eventualmente inventan algoritmos bien afinados e inteligentes atajos que cualquiera de nosotros podríamos aprender si tratásemos y que están cuidadosamente diseñados para tomar ventaja de las cualidades del cerebro y esquivar sus limitaciones.

LENGUAJE Y MATEMÁTICA: LA CONEXIÓN CEREBRAL

En los animales, 6 más 5 no hace 11, sino solo *cerca de 11*: tal vez 10, 11 o 12. Por la estructura de sus cerebros, los animales están condenados a una aritmética aproximada.

Los humanos en cambio hemos heredado por evolución la habilidad de crear sistemas complejos de símbolos, incluyendo lenguajes hablados y escritos. Las palabras y los símbolos, por poder separar conceptos con significados arbitrariamente cercanos, nos permiten movernos más allá de los límites de la aproximación.

El concepto de número, sugerido por los Babilonios, refinado por los Griegos, purificado por los Hindúes y los Árabes, axiomatizado por Dedekind y Peano, generalizado por Galois, nunca ha cesado de evolucionar y los números tienen diferentes nombres y símbolos de acuerdo a las culturas. El actual sistema decimal de números arábigos es el resultado de una larga evolución en el modo de representación numérica. Los números arábigos actuales, son en realidad la creación de los hindúes. Se los denomina arábigos porque los árabes los introdujeron en Europa.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
—	=	≡	+	h	4	7	5	7

Figura 1: Numerales Brahmi en India en el siglo I DC

En la Tabla 1 se listan algunos números, con su nombre para diferentes culturas:

Tabla 1: Nombres de los números en diferentes idiomas

	Español	Ingles	Francés	Alemán	Chino
0	cero	zero	zéro	null	líng
1	uno	one	un	eins	yī
2	dos	two	deux	zwei	èr
3	tres	three	trois	drei	sān
4	cuatro	four	quatre	vier	sì
5	cinco	five	cinq	fünf	wǔ
6	seis	six	six	sechs	liù
7	siete	seven	sept	sieben	qī
8	ocho	eight	huit	acht	bā
9	nueve	nine	neuf	neun	jiǔ
10	diez	ten	dix	zehn	shí
11	once	eleven	onze	elf	shíyī
12	doce	twelve	douze	zwölf	shíèr
20	veinte	twenty	vingt	zwanzig	èrshí
30	treinta	thirty	trente	dreißig	sānshí
100	cien	one hundred	cent	hundert	yībǎi

Veamos con un ejemplo como se forma un número en los distintos lenguajes. El número **293** se nombrará así:

Tabla 2: El número 293 en varios idiomas

Idioma	Nombre	Forma Matemática
Español	doscientos noventa y tres	$2 \times 100 + 9 \times 10 + 3$
Ingles	two-hundred and ninety-three	$2 \times 100 + 9 \times 10 + 3$
Francés	deux cent quatre-vingt-treize	$2 \times 100 + 4 \times 20 + 13$
Alemán	zweihundertdreiundneunzig	$2 \times 100 + 3 + 9 \times 10$
Chino	èrbǎi jiǔshí sān	$2 \times 100 + 9 \times 10 + 3$

Es notable la simpleza del lenguaje Chino, y el modo en que se ajusta perfectamente al sistema decimal. Por ser los nombres de los numerales muy cortos, es bastante común que un hablante chino recuerde números de hasta 9 o incluso 10 dígitos de memoria, mientras que a una persona que hable alguno de los lenguajes de origen occidental (español por ejemplo) le resulta muy difícil recordar números de mas de 6 o 7 cifras.

El sistema de numeración romana se desarrolló en la antigua Roma y se utilizó en todo su imperio. Es un sistema de numeración no-posicional, en el que se usan algunas letras mayúsculas como símbolos para representar los números. El cero no existía en este sistema de numeración. En la cultura maya, al igual que otras civilizaciones mesoamericanas, se utilizaba un sistema de numeración posicional (vertical) de base 20 (primario) y de base 5 (secundario), con tres símbolos y la utilización del cero. Los mayas desarrollaron independientemente el concepto de cero alrededor del año 36 AC. Este es el primer uso documentado de un cero como lo conocemos hoy en día; los mayas parecen haber estado usando el concepto de cero siglos antes que en el viejo mundo. De acuerdo a algunos autores, permite realizar

operaciones aritméticas con menos información memorizada que en nuestro sistema de numeración decimal (Magaña, 1990; Flores, 1976). Las pinturas antiguas muestran a los mayas trabajando con sumas de hasta cientos de millones y fechas tan extensas que tomaba varias líneas el poder representarlas.

En la siguiente tabla (Tabla 3), se muestran los símbolos para los números en diferentes culturas. Nótese como la representación de los numerales, mas allá del 3 cambia de manera notable.

Tabla 3: Símbolos para los numerales en diferentes culturas

	Romano	Maya	Chino
0			零
1	I	•	一
2	II	••	二
3	III	•••	三
4	IV	••••	四
5	V	—	五
6	VI	•—	六
7	VII	••—	七
8	VIII	•••—	八
9	IX	••••—	九
10	X	===	十
11	XI	•—	十一
12	XII	••—	十二
20	XX	•	二十
30	XXX		三十
100	C	=== 	一百

IMPLICANCIAS PARA LA EDUCACIÓN MATEMÁTICA

Los resultados de los estudios neuropsicológicos y el análisis de las particularidades del lenguaje matemático en las diferentes culturas nos pueden dar algunas pistas acerca de que modificaciones podríamos intentar en la enseñanza de las matemáticas.

La evolución genética toma millones de años, es por ello que el cerebro del hombre moderno, es esencialmente igual al del hombre de las cavernas. En cambio, los cambios culturales son mucho más rápidos. Las innovaciones se difunden de cultura en cultura por medio del lenguaje y la educación. Podemos decir que la matemática, en su estado actual, ha surgido en unos pocos miles de años. Fueron los Babilonios quienes sugirieron el concepto de número, los Griegos quienes lo refinaron, pasando por una purificación por parte de los Hindúes y los Árabes, más recientemente Dedekind y Peano lo axiomatizaron, y Galois lo generalizó, y nunca ha cesado de evolucionar de cultura en cultura, sin requerir ninguna modificación del material genético del matemático. Por esto es que los chicos en el colegio aprenden matemática moderna con un cerebro diseñado para sobrevivir en un planeta primitivo.

El cerebro humano posee una flexibilidad tal que le permite planear como atrapar un mamut o demostrar el teorema de Gödel dependiendo del contexto y la época. Pero nuestras habilidades matemáticas están limitadas por nuestros circuitos cerebrales y a pesar de que al igual que los animales, poseemos una representación intuitiva de las cantidades que nos permite aproximar, nuestra memoria, por ser asociativa hace que tengamos enormes dificultades para hacer multiplicaciones. Las tablas aritméticas y los algoritmos de calculo son antinaturales para la mente humana, ¿por qué entonces insistir con ellos en las escuelas? ¿No sería más inteligente enseñarles a usar las calculadoras y las computadoras, para que jueguen con ellas y descubran propiedades y patrones en los cálculos con los números?

La metáfora del cerebro como una computadora digital es totalmente inadecuada. Nuestro cerebro es más bien “analógico” y está bien adaptado para representar cantidades continuas. Esta es la razón por la cual bombardear a los jóvenes cerebros con sistemas de axiomas abstractos es inútil, en nuestro cerebro, la intuición cuantitativa está por encima de los axiomas lógicos.

El concepto de número, de acuerdo a Poincaré, pertenece a los “objetos naturales del pensamiento”, es una categoría innata con la que los humanos interpretamos el mundo que nos rodea. Por ello ni siquiera los axiomas de Peano -que posiblemente sea la mejor axiomatización de la teoría de números que tenemos- logran capturar de modo único nuestras intuiciones de lo que son los números.

BIBLIOGRAFÍA

- Azar, B. (1999). English words may hinder math skills development. *American Psychological Association Monitor Online*, 30(4). Disponible en línea: <http://www.apa.org/monitor/apr99/english.html>
- Benoit, L., Lehalle, H., & Jouen, F. (2004). Do young children acquire number words through subitizing or counting? *Cognitive Development*, 19, 291-307.
- Brannon, E. M., Wusthoff, C. J., Gallistel, C. R., & Gibbon, J. (2001). Numerical subtraction in the pigeon: Evidence for a linear subjective number scale. *Psychological Science*, 12(3), 238-247.
- Butterworth, B. (1998). *The mathematical brain*. London, UK: Macmillan.
- Dehaene, S. (2002). Single-neuron arithmetic. *Science*, 297, 1652-1653.
- Dehaene, S. (1997). *The number sense. How the mind creates mathematics*. New York: Oxford University Press.
- Diaz Diaz, R. (2006). Notes on mayan arithmetic. *Educere*, 10 (35), 621-627.
- Flores García, L. (1976). *El conocimiento matemático entre los mayas prehispánicos*. Instituto Nacional de Antropología: México.
- Holt, J. (3 de Marzo de 2008). Are our brains wired for math? *Annals of Science: Numbers Guy*. The New Yorker, USA.
- Lemer, C., Dehaene, S., Spelke, E. & Cohen, L. (2003). Approximate quantities and exact number words: dissociable systems. *Neuropsychologia*, 41, 1942-1958.
- Magaña, L. (1990). Las matemáticas y los mayas. *Ciencias*, 19, 19-26. Universidad Autónoma de México. Electrocomp: México.
- Nieder, A, Freedman, D. J., & Miller, E. K. (2002). *Science*, 297, 1708.
- Posner, M. I. & DiGirolamo, G. J. (2000) Cognitive Neuroscience: Origins and Promise. *Psychological Bulletin*, 126(6), 873-889.
- Tienson, J.L. (1995) Una introducción al conexionismo. En E. Rabossi (Ed.) *Filosofía de la mente y ciencia cognitiva* (pp. 367 – 370). Barcelona: Paidós.
- Wilson, R. (2007). 4000 years of numbers. Presentación en Gresham College, disponible en línea: <http://www.gresham.ac.uk/event.asp?PageId=45&EventId=622>