



La modelación

Poderosa herramienta cognitiva

Antonio Vélez M.

El milagro de lo apropiado que resulta el lenguaje matemático para la formulación de las leyes físicas es un regalo maravilloso, que no entendemos ni merecemos.

Eugene Wigner

La modelación mental es el gran descubrimiento de la vida. Las experiencias del diario vivir van formando en nuestro cerebro, sobre un substrato heredado, una imagen comprimida del mundo; más exactamente, se van creando en las redes neuronales, a su modo, réplicas de las parcelas del mundo que se experimentan, y se integran en una sola unidad, en un mapa mental que se mantiene en permanente cambio, sin esfuerzo alguno, sin cesar, automáticamente, aun durante el sueño. Y en todo instante nos sirve de guía para gestionar el momento siguiente y dirigir las conductas. La conciencia nos permite percibir esos mapas como imágenes, para luego manipularlos por medio del razonamiento. Aun el mismo pensamiento cambia el mapa mental: recordamos, descubrimos relaciones no observadas antes, inferimos, analizamos y sintetizamos: nuestro mapa mental se infecta de pensamiento.

Cuando entendemos algo, es porque lo hemos representado, en forma clara, ordenada y coherente, en nuestras redes neuronales, y luego lo hemos integrado con el resto. Allí podemos hacer predicciones y anticiparnos a los hechos, antes de comprometernos con la realidad; podemos ensayar sin riesgos ni costos, y luego tomar las decisiones apropiadas. Es posible retroceder al pasado, mediante el recuerdo, y proyectar el futuro con base en todas nuestras vivencias. Como los dioses, podemos estar aquí y allá al mismo tiempo, provechosa ubicuidad mental que evita peligros y economiza esfuerzos. Y podemos crear entes nuevos, casi de la nada. Todo esto convierte nuestros cerebros en creativas máquinas inteligentes.

Pero, además, disponemos de la modelación matemática, quizás el logro máximo de la

inteligencia humana, pues ella constituye una herramienta de pensamiento de una potencia casi imposible de describir. Se trata de una modelación por fuera del cerebro, transhumana. Su esencia es simple: los entes del mundo se reemplazan por símbolos abstractos. Una descomunal metáfora, en el sentido más libre del término. Y es un proceso de suma economía, pues comprime la realidad en expresiones minimalistas: reduce parcelas del mundo a su mínima expresión. La *compresión* o cambio de escala es crucial, pues hace manejable el modelo.

La meta es construir representaciones que sean *físicamente isomorfas*. Esto significa que por cada elemento relevante de la parte del mundo en estudio debe existir su elemento correspondiente en el modelo; y por cada ley o regularidad observada, otra en el modelo que la imite con cierta fidelidad. Imitaciones muy osadas, que solemos llamar *teorías*. Al hacer esto, buscamos que las propiedades formales de los símbolos copien las propiedades pertinentes de la parcela del mundo que hemos elegido, sus invariantes.

Las leyes físicas, entonces, se conmutan en leyes matemáticas, mientras que los teoremas desprendidos de allí se traducen en propiedades del mundo. Nos olvidamos de la realidad física y nos trasladamos a su réplica simbólica o virtual; allí hacemos las preguntas y el modelo nos responde en su lenguaje hermético, abstracto, a veces abstruso, pero económico, sin ambigüedades, lacónico pero preciso. Y confiamos en que las repuestas que obtengamos se correspondan con las propiedades de la realidad. En este nuevo universo de jeroglíficos matemáticos realizamos transformaciones “mecánicas”, que luego “leemos” para que nos revelen propiedades del universo real, muchas veces desconocidas, inéditas; es decir, por medio de estas máquinas virtuales podemos anticiparnos a los hechos, predecir, crear futuro.

La hipótesis de la constancia o estabilidad del fenómeno, esto es, la aceptación de que la ley

física que rige hoy aquí regirá mañana allá, también llamado *principio de inducción*, es el supuesto básico del quehacer científico. Se pasa con cierto atrevimiento de lo particular a lo general, de observaciones locales inferimos leyes universales. Es un típico caso de *amplificación epistemológica*.

La modelación matemática nos evita pensar o, mejor, nos permite pensar de otra manera. Cerramos los ojos y confiamos en que la manipulación ciega del modelo nos lleve a soluciones que se ajusten con fidelidad al mundo. Los modelos se convierten entonces en ampliaciones cognitivas, *extensiones exosomáticas* de nuestra inteligencia. Y así como el microscopio amplía la visión, los modelos amplían el pensamiento y dilatan la imaginación. Con grandes diferencias, siempre a favor de los modelos. Nuestro sistema cognitivo, por ejemplo, entiende muy bien todo aquello que se describa en una, dos o tres dimensiones; pero superado este límite, dejamos de entender. Un espacio curvo de tres dimensiones lo rechaza nuestra intuición, pero es tarea sencilla en los espacios matemáticos. En los modelos, las tres dimensiones de nuestras experiencias terrícolas son casi lo mismo que las cuatro del espacio-tiempo de la relatividad o las más de cuatro usadas para describir la teoría de supercuerdas o, después de un salto audaz, las infinitas dimensiones de los espacios de Hilbert, usados en mecánica cuántica. Más aún, los modelos permiten pensar fenómenos que para nuestra razón desnuda son contradictorios, mientras que a las ecuaciones eso no las perturba.

Platón y Aristóteles, por geniales que fuesen, no podían entender, con sus razones humanas, mundos de esas dimensiones, y, en consecuencia, no podían concebir objetos que las poseyeran. Había verdades físicas muy bien escondidas, invisibles para la razón pura. Pero se requería la lupa prodigiosa aportada por la modelación. La intuición y lo inteligible, antes de que el hombre inventase los modelos matemáticos, tenían frenos y barreras insuperables.

De este modo, entonces, y con gran osadía, hemos copiado el universo real en modelos teóricos que se le asemejan con una pasmosa fidelidad. Un físico llamó a esto “la eficacia irrazonable de

las matemáticas”. Albert Einstein se maravillaba: “El eterno misterio del mundo radica en su inteligibilidad... El hecho de que sea comprensible es un milagro”. Y lo que más nos asombra es que sea comprensible en teorías, agregamos. Uno de los físicos que diseñaron la bomba atómica escribió: “Sigue siendo una fuente inagotable de sorpresa para mí ver cómo unos cuantos garabatos en la pizarra o en una hoja de papel pueden cambiar el rumbo de la humanidad”.

La teoría gravitatoria de Newton, la relativista de Einstein, la mecánica cuántica, la termodinámica, la acústica, el electromagnetismo, la economía, las finanzas, el azar, la estadística... se han convertido en un puñado de ecuaciones que caben, con todos sus desarrollos, en un libro mediano. De cierta forma, el mundo queda convertido en un objeto portátil, domesticado, a nuestro servicio. Lo asombroso es que en ese universo de bolsillo podamos hacer predicciones acertadas que atañen a todo el universo real.

Los modelos matemáticos le permitieron a Einstein descubrir que la presencia de objetos con masa produce deformaciones espaciales en sus vecindades; esto es, que el espacio físico es una especie de esponja invisible y elástica que se deforma ante la presencia de cuerpos con masa, fenómeno imposible de concebir en la mente sin los recursos del instrumento aportado por la modelación. Y algo similar ocurrió con el tiempo: lo que había sido un flujo uniforme y continuo se convirtió en un ente deformable, y distinto su discurrir para espectadores situados en sistemas físicos diferentes. Así, según Einstein, dos gemelos idénticos, situados en sistemas mecánicos distintos, podían envejecer a ritmos diferentes, de acuerdo con sus velocidades relativas (“paradoja de los mellizos”). “¡Imposible, ese hombre está loco!”, exclamaron sus contemporáneos.

Geodésicas en el espacio-tiempo de la relatividad

$$\frac{d^2 x^i}{ds^2} + \Gamma_{jk}^i \frac{dx^j}{ds} \frac{dx^k}{ds} = 0$$

Gracias a la herramienta virtual de la modelación, es posible colarnos hoy por las estrechísimas grietas de la estructura atómica, por allí por donde ya no pasa la visión penetrante de los mejores microscopios. Por allí, justamente, por donde la intuición humana tampoco tiene cabida, el instrumento matemático penetra con facilidad hasta las profundidades de la materia, hasta los mismos quarks. Hemos podido, así, mirar de cerca las entrañas mismas de la materia, con grandes sorpresas. El electrón, por ejemplo, ese ente infinitesimal, presente en todos los elementos químicos, además de comportarse como onda o como partícula, según sus caprichos, no está en ninguna parte; esto es, la probabilidad de hallarlo en un punto cualquiera del espacio es nula, pero siempre anda por ahí, como un fantasma, misterioso; su localización fantasmal la describe una ecuación diferencial, la llamada *ecuación de onda*. Y cuando en un experimento le exigimos que se presente, entonces aparece...

**Ecuación de onda
de la mecánica cuántica:**

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

Ahora bien, llegados al mundo microscópico, nuestro intelecto, que no fue diseñado precisamente para pequeñeces, se sale por completo de foco. Los fenómenos que ocurren en el mundo de lo invisible los debemos aprender sin aprehender. Por ejemplo, el conocido y utilísimo principio lógico del tercio excluido allí tampoco funciona: de un electrón que ha cruzado a través de una placa con dos ranuras muy próximas entre sí (experimento de Thompson) no puede afirmarse que haya pasado por una y sólo una de ellas; tampoco puede decirse que se haya fraccionado. Nuestro sentido común se muestra desconcertado ante semejantes hechos, tan extraños y apartados de la vida corriente. “Es más

de lo que puede hacer un fantasma”, comentaba el psicólogo Sir Cyril Burt.

El mundo físico del siglo XIX, diseñado para nuestra terrícola intuición, y completamente determinado y predecible, fue remplazado de un tajo por un mundo extraño, caótico, impredecible, tanto a escala microscópica como a gran escala, lejos por completo de nuestro sentido común. Se descubrieron, con pesar, perturbadoras limitaciones a nuestro entendimiento, instrumento mental desarrollado por la evolución para desempeñarse con solvencia en un mundo de dimensiones humanas y parámetros físicos muy modestos.

El microcosmos se salió por entero de lo concebible. El azar puro y esencial apareció ligado a todos los fenómenos físicos, y la lógica con que siempre habíamos pensado el mundo, la aristotélica, resultaba insuficiente. Un microcosmos ilógico y caótico, de locura. Y a medida que reducimos la escala de nuestro escenario y nos acercamos al mundo de las partículas elementales, la realidad de los objetos se va esfumando, y su comportamiento se va apartando cada vez más de lo familiar y cotidiano. Entramos al extraño teatro del absurdo, al mundo cuántico. Los modelos matemáticos de la física revelaron que vivimos en un mundo tal que ni la imaginación de los grandes maestros del surrealismo lo hubiese podido concebir.

Principio de incertidumbre

$$\Delta x \Delta p > \hbar$$

Agreguemos que el instrumento matemático se comporta como una prodigiosa bola de cristal para adivinar, esta vez con seriedad, el futuro. Paul Dirac, por ejemplo, descubrió en las ecuaciones la existencia de la antimateria; cuatro años más tarde, Carl Anderson observó el positrón en el laboratorio. El transistor, esa miniatura encantada, sin la cual sería impensable el enorme avance de la tecnología moderna, se descubrió

primero en la realidad virtual de las matemáticas, en el escritorio, que en el laboratorio. Y cuando se detectaron por primera vez las ondas de radio, ya las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell las habían predicho, y nos habían sugerido, sin aún conocerlas, la posibilidad de modularlas y transmitir información codificada en ellas, propiedades que hoy son la base del gigantesco imperio de las telecomunicaciones. La cuantización de la energía de Planck y la teoría atómica de Bohr llevaron a Einstein a predecir el fenómeno de emisión estimulada, y así se anticipó a los descubrimientos del máser y el láser, cuatro décadas antes de su invención.

Ecuaciones del electromagnetismo

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 & \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} & \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

Antes de que los hermanos Wright realizaran su primer vuelo propulsado, las ecuaciones de Bernoulli se habían anticipado y nos habían informado que ciertos objetos de geometrías especiales, al moverse a través de un medio fluido, generan fuerzas de sustentación suficientemente poderosas como para levitar. Y digamos que las pruebas nucleares se hacen sólo para corroborar lo que ya se ha calculado fríamente en el papel, así que cuando se lanzó la bomba atómica sobre Hiroshima, sus desdichados habitantes ya habían sido condenados a muerte en el escritorio, pues el poder devastador del artefacto se conocía por anticipado: el sencillo jeroglífico matemático del pacífico Einstein, $E = mc^2$, encerraba el gran secreto.

Transmisión del calor:

$$\nabla^2 T = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$$

La maquinaria de alta tecnología de las matemáticas nos permite crear atajos en las rutas del tiempo, movernos con suma comodidad de hoy hacia ayer. Al medir la radiación de fondo del espacio, ese débil eco del pasado remoto, hemos podido calcular la edad del universo, y retroceder hasta sus albores, esto es, hasta el nacimiento del tiempo, hace trece mil setecientos millones de años, ese día único, sin ayer, y describir con minuciosidad los trascendentales acontecimientos ocurridos en la primera mañana: las primeras fracciones del primer segundo después de la gran explosión o *big bang* que dio origen al universo; esto es, escribir un nuevo Génesis.

Con la modelación hemos adquirido un poder que nos deja atónitos. Gracias a ella hemos penetrado en el conocimiento de la realidad de un modo inesperado, por lo profundo, por lo detallado, por lo esencial. Es una prótesis cognitiva que nos permite pensar el mundo de una manera enriquecedora: explorarlo, descubrirlo, explicarlo, calcularlo, descifrarlo, entenderlo, predecirlo, manipularlo, cambiarlo, construirlo. Y hasta destruirlo, si no nos civilizamos a tiempo, si no nos desbordan nuestros impulsos cavernícolas. Los prodigios de la magia, reconocámoslo, son un juego trivial de niños al lado de la magia encantada de los modelos matemáticos. Y a su lado, la imaginación más desbordada, extravagante y loca nos parece inocente. ■

Antonio Vélez Montoya (Colombia)

Ingeniero electricista de la Universidad Pontificia Bolivariana y Máster en matemáticas de la Universidad de Illinois. Es autor de los siguientes libros: *El hombre, herencia y conducta*, *Del big bang al Homo sapiens*, *Homo sapiens*, *Medicinas alternativas*, *Parasicología: ¿realidad, ficción o fraude?*, *Principio y fin y otros ensayos*, *De Pi a pa: ensayos a contracorriente*, *Pensamiento creativo*.