

INTRODUCCIÓN

Las bases del pensamiento científico moderno

La ciencia no es un taller donde se fabrican verdades últimas, es un proceso abierto de adquisición de conocimientos con exigencias cada vez más estrictas.

Dieter E. Zimmer^[249].

Wenn wir schlafen und träumen.

LA CIENCIA CRÍTICA

El modo en que investigamos las evidencias en cualquier disciplina científica se llama método, en referencia al camino que hay que recorrer para llegar a la meta. Es el conjunto de procedimientos especiales con que se trata cada tipo de material para extraer de él la información buscada. El método científico se inició como un conjunto de reglas generales que con el tiempo se convirtieron en procedimientos precisos para cada tipo de objeto o fenómeno analizado. Esta multiplicación y diversificación del método ha configurando un área que llamamos metodología. El aumento de la precisión está estrechamente ligado al avance de la matemática a mediados del siglo XIX, a su necesidad de una construcción rigurosa y al desarrollo de su crítica. La crítica se centra en la validez de los resultados analizando también la naturaleza y los límites de los procedimientos. Este enfoque se ha convertido en una parte esencial de toda la investigación científica.

Karl Weierstrass (1815-1897) que subrayaba la necesidad de investigar los fundamentos de la matemática a la luz de una teoría de los números reales, comenzó a crear las bases de esa teoría. Georg Cantor (1845-1918) y Richard Dedekind (1831-1916) siguieron desarrollando la teoría de los números reales para fundamentar el análisis matemático como teoría de los conjuntos, teoría que se ha convertido en un pilar de la matemática moderna. Cantor pensaba que los números son imágenes de los procesos y relaciones que ocurren en el mundo exterior. Con esa idea redujo las entidades matemáticas a objetos lógicos y propició un acercamiento de la lógica a la matemática. Giuseppe Peano (1858-1932) respaldó el acercamiento reduciendo la aritmética a tres nociones fundamentales (número natural, cero y sucesión) y cinco axiomas¹ demostrando que todas las ramas de la matemática se fundan en la aritmética. Peano tradujo la matemática a un sistema de signos y demostró que toda

¹ Los axiomas de Peano: (1) 0 es un número natural. (2) Todo número natural a tiene un sucesor denotado por $a + 1$. (3) No existe un número natural cuyo sucesor es 0 . (4) Los distintos números

proposición matemática puede insertarse en un sistema hipotético-deductivo. La obra de Peano hizo posible el logicismo contemporáneo representado por la contribución fundamental de Bertrand Russell a la matemática.

Russell quedó profundamente impresionado por las contribuciones de Peano y sus discípulos al Congreso de Filosofía de París en 1900 y pensó entonces que la precisión del simbolismo lógico de la matemática podía extenderse a otros campos del saber que, a principios del siglo XX seguían sujetos a la vaguedad filosófica. Las *antinomias* (aparentes contradicciones entre conclusiones válidas que parecen igualmente necesarias y razonables) están en el centro del pensamiento de Russell. En colaboración con Alfred North Whitehead, Russell escribió *Principia Mathematica*^[247], obra que los especialistas consideran un clásico comparable a los mejores escritos lógicos de la Antigüedad y la Edad Media^[225]. Esta obra conduce al desarrollo de la lógica moderna y abre el camino de la computación.

Estos grandes esfuerzos intelectuales se ligan a otros que, entre fines del siglo XIX y principios del XX se concentran en la filosofía, metodología y crítica de las ciencias. Abbagnano^[225], sostiene que la «filosofía de la ciencia» agrupa dos clases de investigación: la *filosófica* que trata de adaptarse al modelo de las ciencias naturales y la *metodológica* que estudia los procedimientos y técnicas lógicas y experimentales de la ciencia. La filosofía de la ciencia del siglo XX es la continuación histórica del positivismo del siglo XIX, pero se separa de éste al introducir la crítica de la ciencia, sus trayendo a la ciencia de la pretensión absolutista –y a menudo metafísica– que tenía en el positivismo. La crítica más fecunda se relaciona con el desarrollo histórico de la ciencia, su estudio de los procedimientos y los límites de su validez, es decir, la *crítica del método*. Richard Avenarius (1843-1896), un profesor de filosofía de la Universidad de Zurich, trata de construir una filosofía rigurosa como las ciencias positivas de la naturaleza, que excluya toda metafísica y se limite a reconocer y elaborar la experiencia. Ernst Mach (1838-1916) que fue profesor de física y de filosofía en la Universidad de Viena, sigue desarrollando las ideas de Avenarius. En su obra *Mechanik*, dice que la ciencia utiliza imágenes o representaciones para remplazar y facilitar el manejo de la experiencia. Los conceptos científicos son signos que resumen las posibles reacciones humanas ante los hechos. Pero esos signos no son subjetivos ni arbitrarios ya que Mach se adhiere a la idea de Newton que la ciencia es una descripción de los hechos, en especial de su uniformidad y constancia. Mach remplaza la idea positivista de la ciencia por la interpretación de los conceptos como signos y las leyes científicas como instrumentos de la predicción. Heinrich Hertz (1857-1894) continúa la idea de Mach de los conceptos como signos pero modifica la idea de la descripción objetiva de la ciencia. Hertz analiza la correspondencia entre las relaciones de los símbolos y las relaciones de las cosas que permiten *predecir los acontecimientos*, es decir, lograr el objetivo fundamental del conocimiento de la naturaleza.

naturales tienen distintos sucesores: si $a \neq b$, entonces $a + 1 \neq b + 1$. (5) Si 0 posee una propiedad que también posee el sucesor de cada número natural, entonces todos los números naturales poseen esa propiedad (Principio de Inducción).

Relacionados con las ideas de Mach, los escritos de Albert Einstein (1879-1955) agregan valor a la crítica de la ciencia. La constancia de la velocidad de la luz demostrada por numerosas mediciones aparece en contraste con la mecánica clásica para la cual las velocidades de cuerpos que se mueven en dirección opuesta se suman. Así, la luz procedente de astros lejanos que se mueven en la misma dirección que la Tierra debería viajar a más velocidad que la luz de astros de los cuales se aleja nuestro planeta. Para Einstein, la constancia de la velocidad de la luz sugiere una deformación de los instrumentos de medida que estarían en estado de movimiento veloz y esto le hace introducir en la física el análisis crítico de los instrumentos, del observador y de sus posibilidades. Mientras que la física clásica prescindía de esos análisis y suponía medidas y caracteres no establecidos por mediciones y observaciones de la realidad, la física relativista subraya la necesidad de observar sin atribuir al objeto físico determinaciones que no resulten de observaciones efectivas. Esta consideración crítica de la ciencia, la *relatividad restringida*, fue enunciada por Einstein en 1905 y afirma que la distancia espacial o temporal no es una entidad o un valor *en sí* sino que es *relativa* al cuerpo que se toma como sistema de referencia y que *no existe un sistema de referencia absoluto*. En contraste con la idea de Newton sostiene que el tiempo y el espacio son dos dimensiones estrechamente relacionadas. En esta versión restringida de la teoría, Einstein también postula la equivalencia de masa y energía, expresada en la famosa ecuación $E = mc^2$, donde E es la energía expresada en ergios, m es la masa expresada en gramos y c es la velocidad de la luz en centímetros por segundo. Como la luz viaja a treinta mil millones de centímetros por segundo, la conversión de una pequeña cantidad de masa produce una gran cantidad de energía². La teoría de la relatividad admite la existencia de leyes, expresadas en ecuaciones diferenciales que permiten pasar de un sistema de referencia a otro. Estos conceptos básicos cambiaron el objetivo mismo de la ciencia. Esta no se basa ya en la uniformidad del fenómeno sino en la uniformidad de las leyes de la física. La teoría reconoce la variabilidad de un fenómeno percibido por distintos observadores pero sostiene la no-variación de las leyes que gobiernan a dichos fenómenos transfiriendo por tanto la noción de *objetividad* de los fenómenos a las leyes. En 1912, Einstein extiende estos conceptos desde los sistemas inerciales a los gravitatorios. La *relatividad general* es una teoría que considera a la gravedad como una propiedad del espacio más que una fuerza entre cuerpos. Debido a la presencia de materia el espacio se curva y los cuerpos siguen las líneas de menor resistencia entre las curvas. En otras palabras, la gravedad es la consecuencia de la curvatura del espacio inducida por la presencia de objetos masivos. La curvatura se mide por un número determinado de coeficientes cuyo valor en el espacio vacío es igual a cero. El coeficiente más importante es el de masa, que expresa

² Un kilogramo de masa puede convertirse en veinticinco mil millones de kilowatts/hora, una cantidad de energía suficiente para satisfacer la demanda de un país industrializado durante varias semanas. Si la conversión a energía se realiza explosivamente, dos kilogramos de masa pueden destruir una ciudad y matar a un millón de personas. Existen dos trágicos ejemplos (Hiroshima y Nagasaki) de este poder de destrucción.

la deformación del espacio-tiempo, que a su vez determina los fenómenos de la gravedad. La generalización del concepto relativista sugiere que las fuerzas gravitatorias e inerciales son equivalentes. El avance introducido por la teoría de la relatividad a la metodología de la ciencia es la necesidad de *considerar las condiciones en que se realiza la observación*. Sobre la base de su teoría, Einstein propuso hipótesis sobre la expansión universal que fueron verificadas por el astrónomo Edwin Powell Hubble (1889-1953) y más tarde verificadas y ampliadas por Robert P. Kirshner.^[235]³

Esta generalización vuelve a confirmarse con el desarrollo de la física atómica cuyo objetivo es el estudio de las partículas resultantes de la desintegración del átomo. En primer término se establece que la observación de un fenómeno lo modifica de manera imprevisible. La energía usada para la observación (por ejemplo, la luz) no puede descender por debajo de un mínimo, el *quantum* de energía o *constante h* descubierto por Max Planck en 1910. Esta energía es suficiente para modificar el fenómeno observado. De esto resulta que toda observación que tienda a determinar la posición de una partícula atómica modifica la velocidad de esa partícula, o que toda determinación de la velocidad modifica la posición. En efecto, *no es posible determinar al mismo tiempo la velocidad y la posición de una partícula cualquiera*. Si se determina la velocidad, la posición queda indeterminada y viceversa. Esto es el *principio de indeterminación* enunciado por Werner Heisenberg en 1927. Utilizando herramientas estadísticas apropiadas se pueden hacer predicciones probables sobre el comportamiento futuro de una partícula atómica que se está observando, pero no predicciones seguras. Así, el determinismo queda excluido de la ciencia y el principio de causalidad que se consideraba fundamental en toda explicación científica y filosófica en el siglo XIX se pone en tela de juicio.^[250]

Es durante esta época de florecimiento de la teoría de la ciencia cuando nace la disciplina que nos ocupa en este libro, el *análisis de polen*. El investigador sueco Lennart von Post la presenta al Congreso de Ciencias Naturales reunido en Cristianía (Oslo) en 1916. Con el trabajo de von Post, la reconstrucción del desarrollo de la biota postglacial sale del estancamiento al que la había conducido el estudio estratigráfico de las turberas y adquiere mayor solidez. Por eso el análisis de polen se expande por Europa Central primero y luego por el resto del continente para llegar a América del Norte en la década de 1930 con obras generales como *Pollen Grains*, de Roger Wodehouse^[215] y los trabajos estratigráficos del noroeste de Estados Unidos de Henry P. Hansen. Von Post se reúne con Lucy Cranwell en Nueva Zelanda para realizar allí el primer perfil polínico del hemisferio sur. También en la década de 1930 comienzan los trabajos del finlandés Väinö Auer en la región sudamericana que llama «Fuego-Patagonia». Iversen^[234] da a conocer su estudio del bosque relictos de Draved en su «Land Occupation in Neolithic Denmark», que es una versión completa del análisis de polen con una interpretación ecológica y una evaluación del efecto de la acción humana sobre el ambiente. También en esta época,

³ Kirshner, Robert. 2003. Keynote speech at the Kennedy School of Government, Harvard University. Noviembre de 2003. Charla invitada por la Dra. Hashima Hasam.

en la Unión Soviética, aparecen los trabajos de M. Kuprianova sobre la morfología evolutiva de los granos de polen y esporas.

En 1948, con la experiencia en comunicaciones e interferencias adquirida en la Segunda Guerra Mundial, E.C. Shannon observa que un mensaje enviado por telégrafo o teléfono sufre diversas deformaciones en el curso de la transmisión de modo que a su llegada ha perdido parte de la información que contenía. En 1949, Shannon y Weaver publican la *Teoría Matemática de la Comunicación* que produce un importante impacto en numerosas disciplinas de las ciencias y las humanidades. Influidos por la corriente probabilística prevaleciente en la ciencia de entonces, Shannon, Weiner y Brillouin proponen un teorema que compara la pérdida de información en la transmisión de un mensaje con la degradación que ocurre al transferir energía de un sistema a otro, como lo describe la segunda ley de la termodinámica. Definen la cantidad de información efectivamente transmitida como *entropía negativa*. La teoría se resume en el modelo, donde H es la

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \log p_i \quad (1)$$

cantidad de información, p_i es la probabilidad de una porción i del mensaje que se transfiere desde un transmisor a un receptor. A veces, \log aparece como \log_2 (logaritmo en base 2, en vez de las bases 10 ó e) para poder expresar los resultados en bytes de información. En la década de 1960 el ecólogo español Ramón Margalef definió al ecosistema como *un canal que transmite información al futuro*. Esta metáfora permite concebir, por ejemplo, la transmisión de información genética de una generación a otra en cada una de las poblaciones que componen la comunidad biótica del ecosistema. Margalef usa el modelo (1) para medir la diversidad biológica como cantidad de información. Así, H es diversidad, $H_{\max} = \log_2 N$ es la diversidad potencial máxima (N es el número total de taxa identificados en el estudio), H'/H_{\max} es la homogeneidad de la distribución de la diversidad, o *entropía relativa*, y $(H_{\max} - H / H_{\max}) * 100$ expresa la redundancia^[239]. Sin embargo, sólo se mide la cantidad de información que puede asociarse a un estado de cosas y la cantidad de información que se transmite desde un punto a otro. La teoría de la información es sólo cuantitativa ya que trata con cantidades de información y no –excepto indirectamente o por implicación– con la información que llega en esas cantidades.^[228]

LA BASE GEOLÓGICA Y LOS DESARROLLOS EN BIOLOGÍA Y QUÍMICA ORGÁNICA

Desde que Aristóteles (384-322 A.C.) reconoció que las conchillas fósiles de las rocas eran similares a las que se encontraban en las playas y dedujo que los fósiles habían sido seres vivos en el pasado, la geología estratigráfica ha realizado enormes progresos. Leonardo da Vinci (1452-1519) reconoció el origen de las rocas sedimentarias, retomó la idea aristotélica de los fósiles como seres vivos del pasado y

concibió la magnitud temporal de la escala geológica. Nicolaus Steno (1638-1686) sostuvo que «en el momento en que un estrato se está formando, todos los materiales que restan sobre él son fluidos y, por consiguiente, en el tiempo en que el estrato más bajo se estaba formando, ninguno de los estratos superiores existía». Esto es lo que conocemos hoy como *Ley de la Superposición*. También sostuvo que los estratos se formaban horizontalmente, idea que hoy llamamos *Ley de la Horizontalidad Original*. Por fin, pensó Steno que en cualquier lugar en que los lados o bordes desnudos de los estratos eran visibles debería buscarse la continuidad de esos estratos en otro sitio y que otra materia sólida (formando los confines de la cuenca) debería haber evitado la dispersión de los estratos. Esto se conoce hoy como *Ley de la Estratificación Oculta*. Charles Lyell (1779-1875) escribió los *Principios de Geología* en 1839 donde sostenía que la clave para entender el pasado estaba en el presente. Steven Jay Gould retomó el tema en el siglo XX con la doctrina del equilibrio puntual, pero fueron Darwin y Wallace quienes primero se beneficiaron con la racionalidad geológica y paleontológica de Lyell para apoyar sus ideas evolutivas. El descubrimiento del Radio por Pierre Curie y su esposa Marie Skłodowska en 1898 condujo al estudio de la degradación de los elementos radiactivos como posibles medios de datación de las rocas y (en 1903) como fuentes del calor geológico. En 1912, Alfred Wegener propuso la teoría de la deriva continental sobre la base de datos geológicos, paleontológicos y climáticos. En 1926 Arthur Holmes elevó el informe de un comité especial a la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos en el que se expresaba acuerdo unánime en que la radiométrica era la única escala temporal confiable en geología. En 1949, Willard Libby desarrolló el método de datación por radiocarbono que tiene especial importancia para el estudio del Pleistoceno Tardío y Holoceno, los últimos 40.000 años de historia de la Tierra. En 1980 Luis Álvarez y varios asociados propusieron que un meteorito o cometa chocó a la Tierra hace 64 millones de años y que ésta fue la causa principal de la gran extinción faunística ocurrida en el límite entre el Cretácico y el Terciario. Eugene Shoemaker tabuló en 1983 el paso de los asteroides y cometas que cruzaban la Tierra y calculó la tasa de impactos de *meteoroides* (asteroides y cometas) sufrida por nuestro planeta. Estos avances han tenido un importante efecto sobre la biología. Ésta utilizó la racionalidad de la sedimentación y la interpretación de los fósiles para identificar pruebas materiales de la evolución. También desechó el catastrofismo por un tiempo para entender procesos que explicaron el desarrollo de la vida en el planeta y, en las últimas décadas retomó la idea del rol de los impactos de meteoroides como causas de catástrofes directamente vinculadas a las grandes extinciones faunísticas de la historia del planeta.

Desde fines del siglo XVIII ocurrieron cambios de importancia en la biología. En verdad, el desarrollo de este campo de la ciencia ha sido y es turbulento. La ignorancia y los intereses creados han atacado, a veces con gran ensañamiento, a la teoría de la evolución cuyo efecto organizador sobre la biología es similar al de la teoría de la relatividad y la teoría cuántica en la física. Las dificultades que ha tenido la teoría de la evolución para alcanzar una aceptación social generalizada fueron brillantemente resumidas por uno de sus creadores, Alfred Russell Wallace, «*la verdad nace en este*

mundo sólo con espasmos y tribulaciones y cada nueva verdad se recibe con resistencia. Esperar que el mundo reciba una nueva verdad sin desafiarla es como buscar uno de esos milagros que no ocurren».

Un médico de Estonia, Karl Friederich Burdach, acuñó en 1800 la palabra Biología que en 1802 fue usada por dos científicos prominentes Gottfried Reinhold Treviranus (en su obra *Biologie oder Philosophie der lebenden Natur*) y Jean Baptiste Lamarck (en su *Hydrogéologie*). El fin del siglo XVIII y todo el siglo XIX fueron ricos en hallazgos biológicos y químicos que, a su vez, influyeron en el desarrollo de la biología. En 1771 se descubrió que *las plantas convierten al dióxido de carbono en oxígeno*. En 1817 se aisló la *clorofila*. En 1828 se sintetizó urea a partir de materiales inorgánicos y estudiando la célula-huevo de los mamíferos se encontró el desarrollo de la *notocorda* y las capas germinales *ectodermo*, *mesodermo* y *endodermo*. En 1836 se descubrieron las enzimas. En 1838 se estableció que todos los tejidos de las plantas están formados por *células* y en 1839 esto se extendió a los tejidos animales. En 1856 se estableció que la *fermentación* es producida por *microorganismos*. En 1858 se sugirió que toda célula proviene de otra célula. Entre 1858 y 1859, se postuló la teoría de la *evolución* basada en la *selección natural*. En 1862 se produjo evidencia para rechazar el principio de la generación espontánea. En 1865 se postuló la existencia de *caracteres hereditarios* dominantes y recesivos como resultado de estudios de cruzamiento con arvejas. En 1865 se descubrió que el *benceno* está formado por átomos de Carbono e Hidrógeno reunidos en un *anillo hexagonal*. En 1869 se descubrieron los *ácidos nucleicos* en el núcleo de las células. En 1874 se hizo una representación estereoquímica tridimensional de las moléculas orgánicas y una *estructura tetraédrica* para el átomo de Carbono. Asimismo se hicieron contribuciones a la química orgánica para tratar de explicar el fenómeno de la actividad óptica considerando que las ligaduras químicas entre los átomos de Carbono y los átomos de otros elementos que ocupan posiciones vecinas en las moléculas están orientadas hacia los *vértices de un tetraedro regular*. En 1876 se vio que los huevos fertilizados poseen *núcleos femenino y masculino*. En 1884 se analizaron las *estructuras de los azúcares*. En 1898 se demostró mediante experimentos de filtrado que la enfermedad de las plantas conocida como «*mosaico del tabaco*» se debía a algo más pequeño que una bacteria y se lo denominó *virus* (del latín, veneno).

El siglo XX agrega velocidad a esta cadena de desarrollos y descubrimientos. En 1906 se desarrolla la *cromatografía*, una técnica para separar compuestos orgánicos. En 1907 se muestra que es posible *condicionar* la respuesta de la salivación en los perros, se *sintetizan cadenas pépticas de aminoácidos* y se demuestra que las proteínas están conectadas por aquellas. En 1911 se propone que los factores mendelianos están alineados en los cromosomas. En 1926 se muestra que la enzima *ureasa* es una proteína. En 1928 se identifican la reacción de *cicloadición* para formar *moléculas anulares* y el primer antibiótico, la *penicilina*. Un año después se descubre el azúcar *desoxirribosa* en los ácidos nucleicos. En 1929 se descubre la *estrona*, una hormona estrogénica secretada por el ovario. En 1930 se demuestra que la enzima llamada *pepsina* es una proteína. En 1931 se descubre la androsterona. En 1932 se descubre el ciclo de la urea. En 1933 se realiza la primera síntesis artificial de una

vitamina, la *vitamina C*. En 1935 se usa *deuterio* como trazador para estudiar el sistema de depósitos grasos de la rata. En 1935 se cristaliza el virus del mosaico del tabaco y se describe el proceso llamado impresión («*imprinting*») por el cual los pájaros jóvenes reconocen a sus progenitores. En 1937 se descubre el *ciclo ácido tricarboxílico*, (del *ácido cítrico* ó *de Krebs*) que todos los organismos vivientes utilizan para la respiración celular aeróbica que ocurre en las mitocondrias de los eucariota y en el citoplasma de los procariotas. En 1937 se reúne la evolución con la mutación genética. En 1938 se descubre un *coeloacanto viviente* frente a la costa de África del Sur. Estos extraños peces se conocían hasta entonces sólo en el registro fósil del Cretácico. En 1940 se da a conocer la *ecolocación* por sonar que realizan los murciélagos. En 1942 se prueba que la resistencia de las bacterias a la infección viral se debe a *mutaciones al azar* y no a cambios adaptativos. En 1944 se muestra que el ADN de los neumococos contiene su *código genético* y se sintetiza la *quinina*. En 1948 se demuestra que en el ADN la *cantidad de unidades* de guanina es igual a la de citosina y que la de timina es igual a la de adenina. En 1951 se sintetizan el *colesterol* y la *cortisona*. En 1952 se usan trazadores radiactivos para mostrar que el material genético de los *virus bacteriófagos* es ADN, se completa el análisis cromatográfico de la *secuencia de amino ácidos de la insulina*, se usa la difracción de rayos X para estudiar la *estructura del ADN* y se sugiere que el soporte estructural constituido por azúcar-fosfato está hacia afuera de la molécula. En 1953 se propone la estructura *doble helicoidal* para la molécula de ADN, se demuestra que pueden *formarse aminoácidos haciendo pasar energía (simulando un rayo) por un recipiente que contiene agua, metano y amonio*, y se determina la estructura de la *hemoglobina* usando difracción de rayos X. En 1955 se descubre la enzima *polimerasa* del ARN. En 1960 se descubre que las soluciones concentradas de cianuro de amonio en agua pueden producir adenina y se sintetiza la *clorofila*. En 1967 se usa el trasplante de núcleo para producir el primer clon de un vertebrado (la rana «*clawed*»). En 1968 se usa fósforo radiactivo como trazador cromatográfico para descifrar una secuencia de ARN de 120 bases de largo. En 1970 se descubren las *enzimas de restricción del ADN* y la enzima *reverso-transcriptasa*. En 1972 se propone el *equilibrio puntuado* en la evolución que subraya la necesidad de estudiar el presente para descifrar el registro paleontológico. En 1974 se demuestra que una mezcla de monómeros de nucleótidos y ARN-replicasa da origen a moléculas de ARN que se replican, mutan y evolucionan, que el ARN puede replicarse sin ARN-replicasa y que el Zinc ayuda a la replicación. En 1977 se descubren comunidades animales *quimiosintéticas* alrededor de las fumarolas submarinas en las Galápagos, se introduce una técnica para el secuenciado rápido de genes. En 1978 se presenta la secuencia de 5.386 bases del virus PhiX174, es la primera secuenciación de un *genoma completo*. En 1982 se introduce el concepto de *prion* (una proteína patogénica). En 1983 se inventa la reacción en cadena de la *polimerasa*. En 1984 se crea un método para la identificación genética llamado «*fingerprinting*» (impresión digital). En 1985 se descubren la molécula de *Buckminsterfullerene*, con 60 átomos de Carbono y muy estable debido a su estructura con forma de esfera formada por celdillas. En 1986 se demuestra que las enzimas pueden funcionar en ambientes no acuosos. En 1990 se descubre que la

Buckminsterfullerene puede extraerse del hollín porque es soluble en benceno. En 1996 la oveja Dolly es el primer *clon de un mamífero adulto*. La NASA propone la creación de la Astrobiología heredera de su exitoso programa de Exobiología y emparentada con la actividad que los científicos soviéticos denominaron Cosmobiología: la búsqueda de la vida en el universo.

Dos acontecimientos importantes marcan el comienzo del siglo XXI: en el año 2001 se publica en la revista *Science* el primer manuscrito del *genoma humano completo* y en el 2003 *se produce el primer virus* a partir de componentes elementales.

LA LINGÜÍSTICA

En una ruta paralela al desarrollo de las ciencias, en las Humanidades se desarrollaba un proceso de revisión y actualización en la lingüística. Esta disciplina trata con sistemas complejos y está por ello emparentada en cierto modo con la ecología.

Uno de los pioneros del pensamiento estructuralista es el lingüista suizo Ferdinand de Saussure (1857-1913), quien consideró a la lingüística como una rama de la ciencia de los signos a la que propuso llamar semiología⁴. De Saussure desarrolló una lingüística *sincrónica* en contraste con la visión *diacrónica* (histórica) prevaleciente en el siglo XIX. Desde esta nueva perspectiva miró a la estructura del lenguaje como un sistema en funcionamiento en un momento dado del tiempo. Esta noción de *sistema* y la distinción de los tiempos *sincrónico* y *diacrónico* encontraron su expresión en la *Antropología Estructural* del investigador francés Claude Lévy-Strauss que, a su vez, tuvo gran influencia en la teoría antropológica de las décadas de 1960 y 1970.

Noam Chomsky^[36] definió la lingüística transformacional en su libro, *Aspectos de la Teoría de la Sintaxis*. En un lenguaje, cada oración tiene dos niveles de representación: una *estructura profunda* y otra *superficial*. La estructura profunda (que es una representación directa de la *semántica*⁵ de una oración) se expresa a través de las *transformaciones* sobre la estructura superficial (que responde directamente a la forma *fonológica*⁶ de la oración). En opinión de Chomsky existen muchas similitudes en la estructura profunda de todos los lenguajes. Estas estructuras deben mostrar las propiedades comunes a todos los lenguajes, que permanecen escondidas bajo las estructuras superficiales. Este modelo lingüístico me pareció útil para desarrollar una «palinológica transformacional»^[52]. Chomsky ha modificado su teoría desde entonces pero yo no he podido identificar en ella aspectos que se adapten a la ciencia natural como lo hacía su teoría de 1965.

⁴ Un signo es la unidad básica de una lengua (un lenguaje dado en un momento del tiempo). Cada lengua es un sistema completo de signos. La palabra (la expresión hablada de un individuo) es una manifestación externa de la lengua.

⁵ La semántica estudia los desarrollos lingüísticos clasificándolos y examinando los cambios de significado.

⁶ La fonología es el conjunto de hechos fonéticos (los sonidos o voces) de un lenguaje.

En 1968, Jean Piaget realizó una síntesis de las principales corrientes del estructuralismo a las que caracteriza por su rasgo común: las estructuras. Para Piaget, una estructura comprende tres caracteres, la *totalidad*, las *transformaciones* y la *autorregulación*. *Totalidad* es un agregado con coherencia interna. El arreglo de las partes es total y se diferencia por ello de una mezcla formada por partes independientes. Sus partes forman un conjunto reunido por leyes de composición que determinan la naturaleza del conjunto y la de sus partes. Esto confiere a sus partes mayores propiedades que las que tendrían en forma separada. Una estructura es, por consiguiente, muy diferente de un agregado: sus partes no tienen una existencia independiente fuera de la estructura similar a la que tienen dentro de ella. La estructura es bipolar. Las leyes que la gobiernan hacen que sea tanto *estructurada*, es decir poseedora de las propiedades de una totalidad integrada, como *estructurante*, es decir, capaz de formar estructuras a través de procesos *transformacionales*. Finalmente, la *autorregulación* implica que la estructura no necesita acudir a entidades externas a ella para validar sus procesos transformacionales (Hawkes 1986). Es cierto que las estructuras se cierran sobre sí mismas pero ese cierre no impide que una estructura entre como subestructura de otra estructura mayor. Esta modificación de sus límites, sin embargo, no significa la pérdida de identidad ya que no se trata de una anexión sino de una *confederación* de estructuras en la que las leyes de composición de la subestructura se conservan inalteradas y así la reunión sólo significa un enriquecimiento^[166]. Por otra parte, hay estructuras que se transforman en el tiempo y que no son estrictamente matemáticas o lógicas. Son las estructuras lingüísticas, sociológicas, psicológicas, etc., y su regulación es el resultado de un juego de anticipaciones y retroacciones (*feedback*). El dominio de aplicación de estas estructuras también incluye a la vida. Son las regulaciones fisiológicas y la homeostasis del genoma o del pool génico.^[166]

¿ORDEN EN EL CAOS?

Ilya Prigogine^{[244], [245]} recibió el Premio Nobel de Química en 1977 por sus contribuciones al estudio de sistemas termodinámicos que se hallan lejos del equilibrio y en particular por su teoría de las estructuras disipativas. Sus investigaciones han aportado algunas ideas valiosas para esta discusión. El tema central de sus trabajos es el rol del tiempo en la física y en la biología y ha permitido comprender los procesos irreversibles en los sistemas que están en condiciones lejanas al equilibrio. Sus trabajos en las estructuras disipativas estimularon a los científicos de todo el mundo a investigar temas que podrían mejorar nuestra comprensión de los sistemas biológicos. Sin embargo, la idea de escalas temporales diferentes que coinciden en los cortes que hacen los científicos para su análisis, no es nueva para los estratígrafos ni para los arqueólogos, pero llega a la filosofía desde la perspectiva de la física. Prigogine también se ocupa de la teoría del caos, sobre la que publicó la obra *The End of Certainty* y, con Isabelle Stengers, *Order Out of Chaos*.

La *teoría del caos* ha hecho su contribución a la filosofía de la ciencia a partir de 1960. Es una *teoría de sistemas dinámicos no-lineales* que son altamente sensibles a

las condiciones iniciales. La atmósfera, la tectónica de placas, la economía y el crecimiento de la población son ejemplos de tales sistemas. La teoría del caos da por tierra con las esperanzas que tenían algunos científicos que, basados en las ideas seminales de Newton, querían explicar el comportamiento de sistemas complejos mediante ecuaciones lineales. Esperaban que las supercomputadoras les permitieran procesar una gran cantidad de variables y reducir la incertidumbre inherente a la operación de sistemas complejos. Los meteorólogos estaban interesados en hacer predicciones a largo plazo. Edward Lorenz, un meteorólogo del Massachusetts Institute of Technology (MIT) intentó usar ecuaciones lineales en una supercomputadora para hacer las esperadas predicciones y fracasó. Pero, como sucede a menudo, este fracaso lo llevó a demostrar algo mucho más básico y general: los procesos de los sistemas caóticos dependen grandemente de las condiciones iniciales y las consecuencias de pequeñas variaciones son impredecibles.

Un sistema dinámico no-lineal puede tener una o más de las siguientes características: estar siempre en reposo, estar siempre en expansión, tener movimiento periódico, casi-periódico, o caótico. El comportamiento puede depender del estado inicial del sistema y de los valores de sus parámetros. El *movimiento caótico* es complejo, *no-periódico*, afecta a un sistema *integrado*, es *sensible a las condiciones iniciales*, es transitivo y sus órbitas periódicas deben ser densas. La *sensibilidad* a las condiciones iniciales hace que dos sistemas no lineales con una mínima diferencia en sus estadios iniciales terminen con una diferencia finita entre ellos mientras que dos sistemas determinísticos con idénticas condiciones iniciales permanecerán idénticos. Un ejemplo de la sensibilidad a las condiciones iniciales es el *efecto mariposa* por el cual el movimiento de las alas de una mariposa produce pequeñísimos cambios en la atmósfera que, a través del tiempo la hacen divergir de lo que hubiese sido y tienen el potencial para causar un fenómeno de la magnitud y dramatismo de un tornado.

Este apretado e incompleto recuento del desarrollo del saber riguroso (científico y lingüístico) desde los precursores de fines del siglo XVIII hasta comienzos del siglo XXI se ha introducido para dar al lector una idea de la complejidad de este campo. En contraste con los desarrollos y teorías de la matemática, la física y la química inorgánica, la química orgánica y todas las transiciones desde la química biológica a la biología molecular, celular, de los organismos, de las poblaciones y los ecosistemas (y la lingüística) son de una enorme y creciente complejidad. Hay confusión epistemológica entre el uso de los principios reduccionistas —que son ineficaces en este contexto— y la imperiosa necesidad de reducir el lenguaje de las «ciencias blandas», lo que equivale a lograr mayores niveles de formalización.

En síntesis: en poco más de dos siglos la metodología de la ciencia se convirtió en un gran cuerpo de procedimientos específicos. En este proceso ha sido crucial la crítica matemática que condujo al desarrollo de la teoría de los números reales sobre la que se basa el análisis matemático como teoría de los conjuntos. Con las nociones de número natural, cero y sucesión y cinco axiomas se demuestra que toda la matemática se funda en la aritmética. Esta reducción preñada de poder abre las puertas al pensamiento científico del siglo XX por donde pasa pronto la extensión

del simbolismo matemático a la lógica y desde allí —y en una rica interacción con la tecnología— se gesta la revolución de la computación. Mientras tanto el desarrollo de las ciencias exactas y los numerosos descubrimientos de la ciencia natural afectan a la filosofía. Se trata de abandonar la metafísica para reconocer y elaborar la experiencia. Se mediatiza la experiencia con imágenes o representaciones y los conceptos. La exigencia de correspondencia entre la realidad y los signos permite predecir la naturaleza mediante el procesamiento de sus signos.

La velocidad constante de la luz desarma los conceptos de la física clásica y abre paso a la relatividad y con ella el análisis crítico del instrumental, del observador y sus posibilidades. Las medidas son relativas al cuerpo que se toma como sistema de referencia y no hay un sistema de referencia absoluto. Como en el Renacimiento, la humanidad es el centro pero no el centro del universo sino sólo el centro de nuestro sistema de observación. Tratando de cosechar la enorme cantidad de energía encerrada en la masa se mira a su unidad mínima, el átomo, y se la desarma. El estudio de las partículas subatómicas aporta dos conceptos esenciales a la ciencia de nuestros días: (1) la energía usada para observar un objeto lo modifica y (2) no es posible determinar al mismo tiempo la posición y la velocidad de una partícula cualquiera. En consecuencia, el determinismo abandona la escena de la ciencia y el principio de causalidad se pone en tela de juicio. Los desarrollos de las ciencias biológicas y la química orgánica son cuantiosos y dan una idea de la dificultad para avanzar cuando tratamos con niveles más altos de organización de materia.

Como dijimos, en este agitado tiempo para las ciencias exactas y la teoría de la ciencia, el análisis de polen irrumpe entre las herramientas de la historia natural para explicar el desarrollo de la vegetación escandinava después de la última glaciación. Los arqueólogos europeos lo usan para describir el proceso ambiental que acompañó al desarrollo de la sociedad y, en Jutlandia, se muestran los efectos de la acción humana sobre la vegetación. A fines del siglo XIX se sugiere que las cantidades crecientes de dióxido de Carbono inyectadas en la atmósfera por las actividades de la revolución industrial reforzarán el «efecto invernadero» natural creando un aumento global de la temperatura. La verificación de esta idea debe esperar un siglo, hasta nuestros días, y el efecto se conoce como *calentamiento global*.

La Primera Guerra Mundial interrumpe muchas actividades pero a su fin, la ciencia y la tecnología colaboran eficazmente en las tareas de reconstrucción y convencen a los gobiernos de las ventajas de invertir recursos en la investigación científica y en el desarrollo tecnológico. La Segunda Guerra Mundial encuentra una aviación desarrollada, usa sistemas de comunicación avanzados y a su fin utiliza la física relativista y cuántica en la peor de las posibles aplicaciones del saber: la bomba atómica. Durante la Guerra, las comunicaciones eran interferidas y la cantidad de información que se recibía era menor que la que se enviaba. La ciencia aprendió a circunvalar este problema mediante la redundancia. Midió la cantidad de información recibida creando una metáfora de la segunda ley de la termodinámica: la entropía negativa. A partir de la teoría de la comunicación se pensó en los mecanismos de control o manejo y se creó una actividad científica a la que se llamó *cibernética*. Se desarrolló la computación en aparatos únicos, accesibles sólo en

grandes laboratorios. La miniaturización lograda sucesivamente por los transistores y los chips las ha hecho pequeñas y accesibles para todos. El concepto de causalidad, aunque cuestionado, navegaba bastante bien con las ecuaciones lineales. Se esperaba llegar a una computadora poderosa para procesar simultáneamente una enorme cantidad de ecuaciones lineales y así predecir sistemas complejos. En Cambridge (Massachusetts) se intentó la hazaña y el resultado no fue el esperado sino el hallazgo de sistemas complejos, dinámicos, no lineales y muy sensibles a las condiciones iniciales: es posible que el movimiento comenzado cuando una mariposa bate sus alas termine en un huracán. Si esto es concebible por la mente humana, tal vez las computadoras pueden procesar ecuaciones no-lineales de modo semejante al que usa el cerebro humano. La inteligencia artificial y más específicamente las redes nerviosas parecen responder bien a este desafío repetido de predecir la naturaleza.

Tanto desde las ciencias «duras» como desde las «blandas» la crítica de los siglos XIX y XX nos ha presentado un panorama a veces claro y otras veces confuso, pero siempre fascinante y preñado de desafíos para el siglo XXI que acabamos de estrenar.

LAS TEORÍAS DE LA CIENCIA EN NUESTROS DÍAS

Para establecer una teoría científica es necesario satisfacer los requerimientos lógicos de la ciencia y entender la naturaleza probabilística de toda interpretación. Cuando se trabaja en biología y ecología se trata con un nivel de organización de la materia que es superior al de la física y la química y por ende con niveles de formalización inferiores a los de aquellas ramas de la ciencia. El ecólogo trabaja en el campo, en el laboratorio y en la oficina, usa computadoras para organizar sus datos, analizarlos con métodos numéricos y gráficos y volcarlos en modelos para hacer predicciones y simulaciones. Igual que otras actividades creativas, la investigación ecológica requiere herramientas adecuadas para la tarea, materiales y habilidades especiales.

Hilborn y Mangel^[233] conciben cuatro componentes para la detección ecológica: (1) las hipótesis, (2) los datos, (3) la bondad del ajuste y (4) los procedimientos numéricos. Para estos autores existen puntos de vista alternativos en la metodología científica y en el rol que juegan los modelos. La ciencia es un proceso de aprendizaje sobre la naturaleza en el que las ideas compiten para explicar cómo funciona el mundo y son medidas y contrastadas con observaciones de la naturaleza^[229]. Como nuestras descripciones son incompletas y nuestras mediciones tienen alguna imprecisión, se han desarrollado métodos para estimar el grado de concordancia existente entre nuestras ideas y nuestras observaciones.

El proceso científico fue descrito muchas veces y las descripciones estuvieron siempre teñidas por la ideología de los respectivos autores. Una visión generalizada en los Estados Unidos es la que Platt^[242] describe como de «fuerte inferencia» y consiste en los siguientes pasos: (1) proposición de hipótesis alternativas; (2) concepción de uno o más experimentos con posibles resultados, cada uno de los cuales excluiría una o más de las hipótesis alternativas; (3) desarrollo del experimento;

(4) repetición del procedimiento para generar una secuencia de hipótesis y refinar las posibilidades de aquellas que no fueron descartadas.

El proceso descrito por Platt es una extensión práctica de los trabajos del pensador austriaco Karl Popper^[243] y su «revolución» de la ciencia (y la epistemología) del siglo XX. Popper cree que no se puede probar que las hipótesis son válidas sino solamente probar que no lo son. El método de Popper consiste en «desafiar» repetidamente una hipótesis dada mediante experimentos críticos. La «falsificación» de hipótesis se basa en el *principio de refutabilidad* y consiste demostrar la invalidez de aquella confrontándola con los datos. En cambio, si la hipótesis se mantiene en pie a través de los experimentos, no es validada o convalidada sino que adquiere cierta *respetabilidad* por la cual, en la práctica, se la trata *como si fuese verdadera*. Los mecanismos del proceso propuesto por Popper fueron facilitados por el florecimiento de la estadística moderna asociada con la *validación de hipótesis*. En este proceso, los investigadores ponen a prueba una hipótesis contrastándola con otra que establece exactamente lo contrario (*hipótesis de nulidad o hipótesis nula*) y calculan la probabilidad de que los datos satisfagan esa hipótesis. Si la probabilidad es muy baja, se puede rechazar la hipótesis nula y considerar que la hipótesis es *provisoriamente válida*.

Thomas Kuhn (1962)^[236] introduce tres conceptos a la discusión: ciencia normal, paradigmas y revoluciones científicas. Estos conceptos han dado forma a la percepción actual de la ciencia por parte de los académicos y del público en general. La mayoría de los científicos opera dentro de la ciencia «normal» basada en paradigmas que son *modelos de la realidad* o sistemas de hechos, teorías y filosofías ampliamente aceptadas y que se convirtieron en marco de referencia del pensamiento científico aplicado a cualquier problema. La ciencia «normal» opera dentro del paradigma vigente reforzándolo con nuevos hechos y experimentos pero sin desviarse de él. A su vez, el paradigma establece qué experimentos hay que hacer, qué datos hay que tomar y cómo hay que interpretar los resultados. En opinión de Kuhn, el cambio en la ciencia ocurre cuando se acumulan muchos datos contradictorios que el paradigma existente no puede explicar y cuando existe un paradigma alternativo capaz de explicar las discrepancias entre el viejo paradigma y las observaciones. Mientras que una anomalía particular puede explicarse como un problema en la medición, una colección de datos y experimentos contradictorios conduce a una revolución. Por cierto, la publicación del libro de Kuhn, *La Estructura de las Revoluciones Científicas* en sus numerosas ediciones desde 1962 ha tenido un importante efecto en la percepción académica y social de la ciencia.

En opinión de Fuller^[232], dentro del contexto histórico en que surge la síntesis de Kuhn hay *factores personales y de situación*. Entre los *personales*, Kuhn pertenece a una generación de científicos entrenados en física que maduró a comienzos de la Segunda Guerra Mundial. Durante ese tiempo, la física que parecía continuar a la filosofía natural a través de la experimentación se convirtió en un monstruo técnico y social, la «gran ciencia» desilusionando a Kuhn. Entre los *factores de situación*, el currículum para la Educación General en Ciencia creado por quien era a la vez Presidente de la Universidad de Harvard y Administrador de la Bomba Atómica de

los Estados Unidos, James Bryant Conant dió a Kuhn la oportunidad de canalizar su desilusión de manera productiva. Como artífice de la conversión de la física en la «gran ciencia», Conant estaba preocupado por la percepción pública de la ciencia si se la entendía exclusivamente como responsable de los efectos de la bomba atómica. Tal vez Kuhn desarrolló la idea de la estructura de las revoluciones científicas para inducir a los estudiantes a abstraer la pauta del proceso científico que se mantuvo constante durante los grandes cambios sociales y técnicos de la ciencia a lo largo de su historia. Este supuesto objetivo de Kuhn se superpondría convenientemente con el de Conant de ofrecer al público una imagen de la ciencia divorciada del horror de la bomba atómica.

Según Fuller, el efecto general de la *Estructura* fue desviar las tendencias críticas a la «gran ciencia» que surgían en la década de 1960 tanto en la esfera académica como en el resto de la sociedad. El desvío aumentó la fragmentación de las ciencias y el profesionalismo marcando, en opinión de Fuller, un alejamiento del ideal de Kuhn de una ciencia unificada, continuación de la filosofía natural con medios más exactos. La mayor fragmentación de la ciencia no satisfacía a Conant ni a Kuhn, pero en ella radicaba la popularidad de la *Estructura* en una audiencia de gran diversidad que incluía en un extremo a los científicos «normales» y en el otro a los que se proclaman «postmodernos». Esta multiplicidad de adeptos produjo más deformaciones cuando en algunos países se profesionalizaron las especialidades en defensa de una «ética» caracterizada por la gula en el momento de repartir la torta, que desvirtúa las relaciones interdisciplinarias y los objetivos de la ciencia.

Poco tiempo después de la influyente obra de Kuhn, Michael Polanyi (1969) describe su «república científica» como una comunidad de pensadores independientes que cooperan en un ambiente relativamente libre. En tal comunidad los alumnos se entrenan con sus maestros de modo que la práctica de la ciencia es análoga al aprendizaje de una artesanía en que las habilidades que necesita el artesano en formación son su capacidad de observación y su participación en la tarea. En esa república, los científicos se eligen a través del sistema de aprendices que los hace pasar por una cadena de maestros. Este sistema evita que la ciencia se torne senil o rígida ya que los aprendices adquieren el nivel de sus maestros y desarrollan su propio juicio crítico en materia científica. Para Polanyi (1969) hay tres criterios en el juicio científico: (1) plausibilidad; (2) valor científico (consistente en la precisión, interés intrínseco e importancia); y (3) originalidad. Los dos primeros criterios estimulan la conformidad con lo ya establecido, mientras que la creatividad estimula el pensamiento creativo y el desacuerdo. Esto constituye la tensión del campo científico y los tres criterios pueden usarse en la confrontación de modelos y datos. *La confrontación más importante, sin embargo, es entre modelos es decir entre descripciones diferentes de cómo opera la naturaleza.*

En opinión de Hilbron y Mangel^[233] hay cierta superposición entre las ideas de Polanyi y las de Kuhn. El sistema de los «aprendices» del primero es la esencia de la «ciencia normal» del segundo ya que los aprendices aprenden de sus maestros y continúan desarrollando la problemática a lo largo de sus carreras. El científico inusual es quién rompe la cadena y entra en un nuevo campo o, si no existe, lo crea.