

Camino a la complejidad

Revoluciones – científicas e industriales

Investigación en complejidad

Carlos Eduardo Maldonado Castañeda

Asociación Rujotay Na'oj
-Pensamientos emergentes-
Junta Cargadora Período 2020 – 2021

Walter Saquec López
Cargador principal

Roberto Tecu Cuxum
Cargador Asistente

Susanne Kummer
Cargadora Contadora

Oscar Azmitia Barranco
Cargador Tesorero

El camino a la complejidad
© Carlos Eduardo Maldonado Castañeda
Primera edición, agosto de 2020
ISBN: XXXXXXXXXXX (digital)

Editor: Oscar Azmitia Barranco
Diseño gráfico y diagramación: Edinio Quex/Maya Na'oj
Corrección de estilo: Walter Saquec López y Oscar Azmitia Barranco

Asociación Rujotay Na'oj
arujotaynaoj@gmail.com

El conocimiento es un bien de la humanidad. Todos los seres humanos deben acceder al saber, cultivarlo es responsabilidad de todos.

Se permite la copia, de uno o más artículos completos de esta obra o del conjunto de la edición, en cualquier formato, mecánico o digital, siempre y cuando no se modifique el contenido de los textos, se respete su autoría y esta nota se mantenga.

Contenido

Introducción	5
Primera parte	
Revoluciones científicas e industriales	9
Capítulo 1	
La primera revolución científica y la primera revolución industrial	11
1.1. Evolución de la ciencia a través del tiempo	11
1.2. La primera revolución científica: la ciencia moderna (clásica). Siglo XIV hasta 1905	13
1.3. La preocupación por seguridades	15
1.4. Una doble nota sobre la ciencia en la modernidad: la biología y la química	19
1.5. La ciencia de la revolución industrial	21
Capítulo 2	
La segunda revolución científica y la segunda revolución industrial	
2.1. Los llamados principios de la mecánica cuántica	27
2.2. La segunda revolución industrial	29
2.3. El carácter contraintuitivo de la segunda revolución científica	31
2.4. Temas recientes de punta de la revolución cuántica	34
Capítulo 3	
La tercera revolución científica y la tercera revolución industrial	35
12.1. 3.1. Lógica y economía de la información	36
12.2. 3.2. El mundo como información	39
12.3. 3.3. Naturaleza de la información	43
Capítulo 4	
La cuarta revolución industrial: una historia en curso	47
Capítulo 5	
La revolución de las ciencias de frontera o de síntesis	52

Segunda parte	
Cómo se investiga en complejidad	64
Capítulo 6	
Cómo investigar en complejidad: un desafío	65
6.1. Tres tipos de ciencia, desde el punto de vista lógico y metodológico	67
6.2. El estudio y discusión de modelos	70
6.3. Con modelos, hacia teorías y ciencias	72
6.4. Algunas ideas en torno a la investigación	74
Capítulo 7	
Herramientas de complejidad	79
7.1. Medición de la entropía	80
7.2. Leyes de potencia	82
7.3. Medición de la aleatoriedad/azar	83
7.4. Metaheurísticas	84
7.5. Modelamiento y simulación	85
7.6. Problema P versus NP	86
7.7. Lógicas no-clásicas	87
Conclusiones	
Recapitulando: el estudio de los fenómenos de complejidad creciente	89
Bibliografía	93

Introducción

No existe una única lectura, comprensión o interpretación de la ciencia; como tampoco de la filosofía. Antes que una falencia, este es un rasgo de riqueza, diversidad y fortaleza, en marcado contraste con la religión, la cual sí asume que existe una única interpretación. (No en vano toda la historia de las luchas religiosas). Este libro presenta una de estas lecturas, a saber: el camino que conduce a la complejidad; esto es, a las ciencias de la complejidad.

La ciencia no existe; es decir, la ciencia, sola, por sí misma, es una abstracción. Los hombres y mujeres de ciencia son mujeres y hombres de acción. En verdad, la ciencia es una forma de actuar en el mundo. Existen, y son posibles, numerosas formas de acción en el mundo. La ciencia es una de ellas. La ciencia actúa mediante buenas explicaciones, a través de teorías, mediante experimentos, con demostraciones, y siempre con base en construcciones argumentativas.

La ciencia, dicho rápidamente, es el resultado de factores intra y extracientíficos. Y nunca unos más que los otros. La complejidad de la ciencia, o la complejidad de la inteligencia, incluso la complejidad de la vida estriban en el entramado y el balance, difícil, entre ambas dimensiones. Recientemente, fue I. Lakatos quien primero llamó la atención sobre estos cruces.

No siempre existió la distinción, y mucho menos la separación, entre la ciencia y la filosofía. Esa separación se debe a Descartes. Y a toda la tradición que bebe o depende de él. A partir de, acriticamente, se aceptó que ciencia y filosofía son distintas. La justificación de base para esta distinción fue el problema del método. La ciencia se apropió del problema del método, y dejó a la filosofía sin esta preocupación; algo que, por lo demás, a decir verdad, la tiene sin cuidado (a menos, claro, que nos situemos en la tradición anglosajona de la filosofía). Una separación semejante es artificiosa, indeseable y altamente perniciosa. Sólo conduce al aislamiento, las divisiones, las sospechas, las jerarquías, los afanes de poder, y muy poco favorece a una buena comprensión del mundo y de la vida. Ningún gran filósofo o científico acepta una distinción semejante.

Cabe precisar los conceptos articuladores de este libro. Una revolución científica es una revolución en la concepción del mundo y la realidad, y en la forma como los seres humanos actúan correspondientemente y se relacionan entre sí. Por su parte, una revolución industrial es una revolución en el trabajo –en el trabajo, y no en el capital–, y por tanto en la forma como se organiza la sociedad. Aquí, el pretexto es el estudio –resumido– de ambas, revoluciones científicas y revoluciones industriales–, a fin de considerar el camino que conduce la complejidad. Este es el tema de base, aquí.

Este tema –la complejidad puede ser entendido de tres formas elementales. De un lado, se trata de ver cómo se va allanando el camino hacia las ciencias de la complejidad, mucho más y mejor que al pensamiento complejo. La razón para esta elección no es difícil: el pensamiento complejo sabe de ética y es eminente o distintivamente antropocéntrico. Pero no sabe nada de ciencia, y lo que dice de ciencia lo dice muy mal. Un autor latinoamericano ha puesto esto suficientemente al descubierto (Reynoso, 2019). En segunda instancia, se trata de reconocer de entrada que la complejidad no es, contra todas las apariencias, el estudio de la no-linealidad, emergencias, autoorganización, y demás. En términos mucho más básicos, es la vida, los sistemas vivos. Así, este libro es un camino hacia una comprensión de la vida y los sistemas vivos y lo que ello significa. Y la tercera forma elemental del tema de base aquí es la forma como podemos comprender al conocimiento; se toma como base a la ciencia, pero gradualmente va siendo evidente que no existen y no son posibles formas de separación y jerarquización, por ejemplo entre ciencia y filosofía, o entre ciencia y artes, y demás. En otras palabras, quien piensa verdaderamente bien, no piensa en compartimientos o compartimentadamente. Pensar no sabe de fronteras, y entonces lo más importante no es, contra Aristóteles y su tradición: aquí empieza la ciencia, aquí termina la poesía, y así sucesivamente.

* * *

He escrito ya dos introducciones a las ciencias de la complejidad. La primera fue por sugerencia de la universidad en la que entonces trabajaba. Realizamos varios seminarios, muchos encuentros, formales e informales, y en un ambiente humanamente muy cálido fue emergiendo la necesidad de escribir un libro semejante. El modelo al que se hizo referencia en su momento fue al estilo de los libros de la colección *Que-sais-je?*, de la prestigiosa editorial francesa PUF (Presses Universitaires de France). El resultado salió muy distinto (Maldonado, 2005). Ese libro fue muy bien acogido y muy pronto se agotó. Un tiempo después surgió la necesidad de hacer una segunda edición, ampliada del mismo. Esa segunda edición fue también muy recibida (Maldonado, 2011), y varios comprendimos que un libro semejante había estado haciendo falta.

La segunda introducción a la complejidad fue publicada en un formato más ágil en 2013 (Maldonado, 2013), con un par de reimpresiones posteriores. Esta también fue muy acogida en diversos lugares.

Pero claro, nunca es suficiente; en ciencia como en la vida. Este libro es el resultado de diversas conferencias y cursos; unos, dictados en la Universidad El Bosque, en la Maestría en complejidad de la Universidad Surcolombiana (Neiva, Colombia), en el doctorado en bioética de la Universidad Militar Nueva Granada, y en el doctorado en educación en Guatemala. Naturalmente, como tiene que ser, por lo demás, los temas se van actualizando y variando. Oscar Azmitia es el principal responsable de que este libro salga a la luz, y debo expresar mi mayor gratitud hacia él. Oscar es el padre espiritual, pues, de este libro.

La ciencia clásica emerge del pequeño mundo de los pequeños intereses de la burguesía; primero en ascenso, y luego triunfante. El lenguaje de esa ciencia –que es, en rigor, todo el lenguaje de la modernidad, se creó para el comercio, el cortejo y la conversación (Ball, 2018). Es decir, un mundo de intereses inmediatos y concretos. En esto consiste, exactamente, la estructura mental de la modernidad.

La segunda y la tercera revolución científicas se hacen posibles a partir de la creación de nuevos lenguajes, destinados a otros temas e intereses que los de la modernidad. Por ello mismo, siempre, el primer objeto en la formación humana es el lenguaje; no la cosa, el objeto o el problema de base. Se trata de la creación de nuevos lenguajes que permitan ver nuevas realidades. Toda revolución va acompañada, siempre, por nuevos conceptos y metáforas. Nombrar, ha sido siempre, una de las labores, ulteriormente, de la poesía.

La segunda y la tercera revolución científicas desafían completamente al sentido común, y con ello, igualmente, todas las capacidades del lenguaje. En verdad, básicamente toda la tradición occidental fue el primado del sentido común. Desde luego que hubo momentos o instancias en las que el sentido común no estaba presente. Todos ellos fueron suprimidos casi totalmente de la memoria de los logros de la familia humana. En términos de alguna psicología, podemos decir que incluso los ángeles y demonios de la Edad Media eran, especialmente los de la cristiandad, resultado de asociaciones. Como Pegaso e Ícaro, o como la historia de la fundación de Roma, y tantos otros relatos.

En el curso del siglo XX y XXI nuevos lenguajes empiezan a emerger y a encarnarse, que buscan expresar realidades con las cuales, cuando se los mira con los ojos del pasado, no estábamos acostumbrados. De hecho, la inmensa mayoría de cosas de las que hoy no ocupamos no las vemos; es decir, no las vemos con los ojos. Calentamiento global, solidaridad, investigación, ADN, RNAm y RNAt, información, vida, cerebro, y muchos toros, son ejemplos de fenómenos contraintuitivos. No en última instancia cabe recordar en este contexto a Magritte, ese pintor que odiaba que lo presentaran como artista: “Ceci n’est pas une pipe”; a propósito del cerebro y tantos otros fenómenos. Estamos viendo cosas hoy que nunca antes jamás la humanidad ni siquiera imaginó. El vacío, materia oscura, energía oscura, big-bang, fermiones, quarks, enlaces de van der Waals, biomas y ecosistemas, todas las ómicas en biología de sistemas: la glucómica, la genómica, la metabolómica, la lipidómica y muchas otras. Estamos viendo agujeros negros, ondas gravitatorias, megas, gigas teras y petas, y tantísimas otras realidades. Vivimos un mundo fantástico, inmensamente rico, como nunca antes, jamás lo había sido. La lista podría hacer indefinida, y siempre apuntaría a lo mejor de la ciencia y el conocimiento de punta en el mundo, hoy.

AL FINAL: [Del libro]. Al final del día, la gran sabiduría no habla ciencia ni tampoco filosofía. La gran sabiduría del mundo habla poesía. (...).



Primera parte
Revoluciones científicas
e industriales

Capítulo 1

La primera revolución científica y la primera revolución industrial

1.1. Evolución de la ciencia a través del tiempo

Existen numerosas formas de racionalidad. Así, por ejemplo, el mito, la religión, la poesía, el sentido común, la filosofía y otras. Sin embargo, por sus consecuencias, la forma más importante de racionalidad es –particularmente a partir de la Modernidad y hasta la fecha-, la ciencia.

En efecto, hace ya mucho tiempo C. Lévi-Strauss dejó establecido en un libro ya clásico -*El pensamiento salvaje* (1964)-, que es imposible, internamente, establecer que la ciencia es superior al mito o, por derivación, a la religión. No hay absolutamente ningún elemento interno, esto es, lógico, epistemológico, metodológico, por ejemplo, que pueda establecer sin ambages que la ciencia es superior al mito o la religión, o al revés. Las diferencias, por el contrario, están en sus efectos. Esto es, por ejemplo, para qué sirven, qué posibilitan, qué impiden, o cómo ayudan a llevar la vida mejor, o no. De esta suerte, el viejo debate, por ejemplo, entre ciencia y humanidades es un problema que no compete propiamente a los seres humanos en su vida cotidiana (Maldonado, 2016a); se trata, básicamente, de luchas de poder. El poder de la ciencia contra la religión, o al revés.

Tal y como la conocemos, la ciencia es una forma joven de conocimiento. Se trata de un tipo de racionalidad que tiene apenas 400 años, que surge una vez que muere la Edad Media y atravesamos por el Renacimiento, ya con el nacimiento de la Modernidad. Sin

embargo, en rigor, la ciencia nace en la historia de Occidente dos veces. La primera es en la Grecia antigua, después de la Tiranía de los Treinta, con el gobierno de Solón y Pericles, en el tránsito de la Grecia arcaica a la Grecia clásica. Allí nace, en la plaza pública la "ciencia", como *episteme*. Se trata de una ciencia que públicamente pide razones y brinda razones. La expresión en griego es *logos didomai*, que significa tanto dar razones como pedir razones. Contra el mito y la religión, la ciencia se caracteriza por procesos argumentativos que trabajan en términos, diríamos hoy, de evidencias, demostraciones, pruebas. La religión como el mito ni piden ni otorgan pruebas o demostraciones. Sus criterios son perfectamente diferentes.

Esta *episteme* –que significaba tanto "ciencia" como filosofía– se formaliza propiamente, mucho mejor que con Platón y Aristóteles, en la obra de Euclides: los *Elementos*. De esta forma, en la geometría en general y con el método axiomático en particular, se sistematiza la forma de pensamiento que define a Occidente, a saber: un tipo de racionalidad deductivo, o lo que es equivalente, hipotético-deductivo. Como es sabido, Euclides parte de cinco axiomas o postulados; y posteriormente formula los teoremas, es decir, las demostraciones de lo que se sigue de los postulados o axiomas. Sin ambages, ser occidentales significa, literalmente, estar pre-juiciados, andar por el mundo con una serie de pre-concepciones y pre-comprensiones, algo que quedó suficientemente expuesto por la filosofía fenomenológica en las versiones tanto de Husserl como de Heidegger. Así las cosas, ser occidentales significa tener principios, por ejemplo, y ver el mundo a partir de los principios –o valores– y establecer hasta qué punto el mundo se adecúa o no a los principios o valores, los cuales por definición, no se cuestionan (= axiomas, postulados), sino, se estudia lo que sigue de ellos (= teoremas). Esta forma de pensamiento, de racionalidad y de vida funda toda una historia de violencia, guerra y exclusión. Es la historia de Occidente. Los griegos dividen el mundo entre los griegos y los bárbaros; el medioevo, entre cristianos y gentiles; en fin la modernidad y el mundo contemporáneo, entre amigos y enemigos, o entre partidarios del sistema de libre mercado y opositores y terroristas; por ejemplo.

Pues bien, la ciencia griega muere, debido a los factores: la decadencia griega, que presencia el período helenístico, y la llegada de los bárbaros que todo lo arrasan: los romanos. El segundo factor es la llegada del medioevo, y con él, de la cristiandad, que impone un tipo de pensamiento único –ese establecido a través de sínodos y concilios– que convierte a una pequeña secta en una gran religión, ulteriormente, dominante en Occidente. Sobre la razón, se impone el imperio de la fe, a sangre y fuego (Eisler, 1997).

El segundo nacimiento de la ciencia tiene lugar después de la muerte de la Edad Media, y cuando, atravesando el *Quattrocento*, Occidente se lanza hacia la modernidad. Un nuevo tipo de racionalidad emerge, en contraste con los diez siglos de pensamiento medieval. Esta ciencia nace pensando el espacio y se llama la física –originariamente no

enteramente separada de la “filosofía de la naturaleza”-. Se trata de la ciencia clásica o la ciencia moderna, dos expresiones para designar un solo y mismo fenómeno.

1.2. La primera revolución científica: la ciencia moderna (clásica). Siglo XIV hasta 1905

Cada época desarrolla la ciencia que puede, y cada época desarrolla la ciencia que necesita; ciencia, pensamiento, racionalidad – aquí, por lo pronto, da lo mismo.

Histórica y sociológicamente, la ciencia moderna es la ciencia de una pequeña clase que va ascendiendo gradualmente. Esta pequeña clase es la burguesía. De hecho, el concepto o la palabra “burgo” aparece por primera vez en el siglo IX en la Toscana italiana. Esa pequeña clase es inicialmente, y durante un largo período, comerciante. Con el tiempo, se tratará de figuras destacadas como Marco Polo, y toda la historia de comercio con la India y la China, y la importancia de las especias (Cipolla, 1998); y más adelante, la historia que se concentra, por ejemplo, en Cristóbal Colón, y el descubrimiento de América y la historia subsiguiente.

Este reconocimiento es importante. La estructura mental de la burguesía se caracteriza por que habla y se interesa tan sólo por lo que ve y toca; justamente, las mercancías. Es lo que hace el panadero, el carpintero, el ebanista, el comerciante o vendedor, y demás. Como es sabido, el hijo hereda la profesión de su padre, y así, hereda y se transmite una misma estructura mental. El mundo es cada vez más, aquello que se puede ver, tocar y coger – materialmente. En la psicología, una estructura mental semejante será llamada como “concreta”.

Una larga observación se impone aquí. Tiene que ver con el quiebre de la visión medieval del mundo, y el surgimiento de la ciencia moderna.

Vale detenernos, con calma, en lo que propiamente significa ser medievales, pues la ciencia moderna nace en oposición radical y como negación del pensamiento medieval.

Los medievales eran originariamente paganos –el paganismo es una muy larga tradición en la historia de la humanidad que se remonta “hasta la noche de los tiempos” (Th. Mann). El paganismo se caracteriza por una multiplicidad de dioses y divinidades de todo tipo. Existen los dioses de las selvas y los bosques, de los ríos y los mares, y el mundo y la naturaleza están literalmente encantados. Existen hadas, ninfas, enanos, gigantes, semi-dioses, cíclopes, gnomos, y toda clase de seres mágicos. Esta estructura de pensamiento medieval se puede observar claramente en textos clásicos de la literatura medieval como

los siguientes: *Los Cantos de Goliardo*, y muy particularmente, el *Carmina Burana* (1981), el *Edda Mayor* (2015) y el *Edda Menor* (2016); en los Cantos y Cantares clásicos de la Edad Media, como el *Cantar de Rolando* (2013), el *Cantar de las Huestes de Igor* (2015), la *Saga de los groenlandeses* y la *Saga de Eirik el Rojo* (2010), *La búsqueda del Santo Grial* (2012); naturalmente, en el *Beowulf* (2006), en la literatura celta (1995), o también, por ejemplo, en la compilación sobre literatura germánica de Borges (1965). Incluso, pero ya con muchos matices, este pensamiento medieval alcanza a sentirse todavía en el *Cantar del Mio Cid*. Otras buenas referencias incluyen, sin la menor duda, toda la gesta de *El anillo de los Nibelungos*, incluso hasta esa versión epónima que es en las manos de Wagner y su ópera.

Como se apreciará sin dificultad, es en la periferia de Europa, entre los nórdicos, los celtas y los germanos o en alguna historiografía sobre los pueblos llamados bárbaros en donde mejor se puede observar esta mentalidad medieval (Heather, 2018). Italia, España y Francia estaban demasiado cerca del poder –El Vaticano–, que fue el principal perseguidor de las estructuras de vida y pensamiento medievales. Tres argumentos rápidos justificaron la persecución de estas estructuras del medioevo: el miedo a las herejías –y las había de todo tipo–, la persecución de la brujería, y la, digamos, institucionalización de una única forma de vida y de pensamiento: el cristiano. La Inquisición jugó, al respecto, el más importante papel para la eliminación, por todos los medios, del paganismo y las herejías, y la imposición de una sola forma de entender el mundo, acorde a los deseos y concepciones de Roma.

Pues bien, Roma y el Vaticano dedicaron cuatro siglos a la persecución y eliminación de cualquier vestigio medieval: esto, es, espiritista, animista, organicista o pagano del mundo y la naturaleza. Cuando al cabo hubieron logrado este propósito –a lo cual, en rigor, van a contribuir dos cosas: la constitución de la orden de los Jesuitas como el ejército de Roma destinado a enfrentarse, literalmente, a todos los peligros de la fe, y la creación u oficialización del Index Librorum Prohibitorum, necesario una vez que Gutenberg y otros hubieron inventado la imprenta.

En los albores de la modernidad se respira un espíritu de miedo y persecución. Indudablemente, las persecuciones de la iglesia cristiana han dado los resultados esperados. No en vano, emerge la reforma protestante, con Calvino y Lutero, principalmente, con el baño de sangre subsiguiente (Pérez de Antón, 2018). Pues bien, la ciencia moderna nace en un ambiente caracterizado por miedo, sangre y persecución. Galileo siente temor por la persecución que Roberto Bellarmino emprende contra él. El mismo Bellarmino, sacerdote jesuita, que llevó a la hoguera a Giordano Bruno por hereje y apóstata. Copérnico pide que su obra sea publicada póstumamente, por miedo a las represalias o las consecuencias. Muchos otros casos pueden ser mencionados (Cipolla, 1993).

Desuerte que la ciencia moderna nace en medio de una dúplice circunstancia: una psicología de miedo generalizada (Gribbin, 2005), y una mentalidad que, concomitantemente, rechaza todo lo que no sea visible, material y tangencial. En esta historia, el capitalismo ha emergido; los primeros banqueros, en Florencia y en la Liga Hanseática, definen la racionalidad emergente, y gradualmente se va imponiendo una mentalidad centrada en la eficiencia y la eficacia. No en última instancia, la deuda con el mundo árabe permanece impagable, pero sin ningún reconocimiento explícito. Nace el capitalismo en su primera fase: como capitalismo comercial, en torno al cual pivota toda la historia el esclavismo, la piratería, la conquista y colonización de América, las guerras en la India, China y Japón con las potencias del mundo occidental. Esta historia ha sido narrada numerosas veces.

Pues bien, la ciencia moderna puede decirse que nace, de manera puntual, gracias a las contribuciones, primero de R. Bacon, luego con las de F. Bacon, y la estructura de pensamiento específica de Descartes –a saber, el dualismo y el mecanicismo–, y con la preocupación por el método. El concepto de *theoria*, tal y como lo conocemos actualmente –por ejemplo, a propósito de la teoría de la evolución o la teoría de la relatividad, aparece por primera vez con Burnet en 1681 (primera edición), con su *Theoria Terra Teluris* (Teoría sagrada de la tierra)¹.

1.3. La preocupación por seguridades

En la Edad Media había una “ciencia”. Era, en su contexto y a su manera ciencia, aun cuando nada tuviera que ver ni con la episteme griega, ni con la ciencia moderna. Se trataba de la Theologia, la cual era llamada *Scientia Magna*. Se trataba de la ciencia de Dios, y de cómo, o bien todos los conocimiento se derivaban de Dios o bien todos los conocimiento conducían a Dios. La teología como “scientia magna” se articulaba en tres dominios fundamentales: la psicología racional, la ontología racional y la cosmología racional. A su vez, esta “scientia magna” tenía una *via regia*; se trataba de la filosofía, la cual era el conocimiento de Dios medio de la razón y: a) para quienes no tenían fe, o bien, b) mientras les llegaba la fe. Dicho brevemente, la filosofía era la vida regia de y para la scientia magna.

La dificultad consiste en que esa ciencia del medioevo murió; falleció cuando los teólogos se dedicaron a matar a Dios, lo cual con una historia larga coincidente exactamente con los Sínodos y Concilios, tiene lugar entre el siglo XIII y el siglo XIV. El resultado fue

¹ Como se observa, así las cosas, el concepto de teoría” deja de tener cualquier afiliación a la “theoria” o al “theorein” de los griegos, en cualquier interpretación posible. Las referencias de la “teoría” a la Grecia antigua quedan, en el mejor de los casos, para erudición y divertimento filosófico. Pero ya nada tiene que ver con la historia subsiguiente que se abre con la modernidad y se proyecta hasta nuestros días. Esta nota de pie de página se convertirá en texto central más adelante.

el Renacimiento –Quattrocento-, incluso con esa lectura, ya clásica, según la cual hubo varios renacimientos (Panofsky, 1983). Burckhardt dibujó como nadie el Renacimiento en esa ambigüedad de vitalidad y decadencia (Burckhardt, 1952).

El desencantamiento del mundo medieval condujo a la ciencia moderna con sus tres rasgos distintivos. La ciencia moderna es mecanicista, determinista y reduccionista. En la jerga académico, esto ha sido llamado como el paradigma cartesiano-newtoniano. Se trata, en verdad, de ciencia mecanicista porque cualquier atisbo de animismo u organicismo desaparece completamente. El mundo es visto como la obra del Gran Relojero, una máquina perfecta. Asimismo, es determinista porque toda la realidad es explicada con base en un aparato físico-matemático riguroso que encuentra en un extremo a la geometría analítica, y en el otro al cálculo infinitesimal. Y finalmente, es ciencia reduccionista porque la totalidad del universo es explicada ulteriormente con base en tres leyes simples: la ley de la gravedad, la ley de la inercia y la ley de la acción-reacción. Newton era considerado en su época prácticamente como un dios.

El medioevo es un mundo lleno de dioses, semidioses, héroes y heroínas, espíritus y seres de toda clase, todos con poderes especiales. Pues bien, toda esa variedad se pierde por completo y termina imponiéndose la idea de un dios único, que no admite, en absoluto, ninguna otra divinidad. Pues bien, la modernidad es la continuación con un lenguaje laico de esta estructura mental, a saber: la ciencia moderna hablará con necesidad de “la” realidad como única. A esta realidad es posible acercarse de una forma determinada. Todo ello funda y condice a al a vez a la ideal método científico. Así, ser modernos significa creer que hay una sola realidad. Semánticamente no caben dilaciones: hasta el día de hoy se trata de la idea de “la” realidad. Como se observa sin dificultad, el ciclo empezado en el medioevo se cierra, pero la misma idea permanece, aun cuando con expresiones diferentes (LeShan y Margenau, 1996). Toda esta historia termina en la modernidad con su máxima creación, el Estado-nación – el Estado, como único y supremo. Triunfa la ciencia moderna a través del gran proyecto: la ciencia hegemónica – todo, una sola y misma cosa.

Se impone una observación acerca de la idea –perfectamente moderna- del método, y que se inaugura con Descartes (*Le discours de la méthode*). La teología, de alguna manera, suministraba seguridades a las personas. La certeza de Dios, y todo lo que se deriva de ella. Perfectamente atada a la iglesia cristiana –y posteriormente sólo a la iglesia católica, después de la Reforma Protestante-, la teología suministraba incluso una cierta idea de ritual en la vida; con ella, la sensación de estabilidad y equilibrio. Sin embargo, con la muerte de la teología, el descrédito del catolicismo, y el acceso al Renacimiento gracias al re-descubrimiento del platonismo y el auge del humanismo (Petrarca *et al.*, 2000), la sensación de certezas se perdió. Es exactamente en este contexto que cabe entender la búsqueda de Descartes de una verdad apodíctica.

Originariamente, el "método" se compone, en su etimología griega, de dos palabras: *metá* y *hodós*; el primero puede ser entendido en este contexto como "a través de" (teniendo también el sentido de "más allá de", como en la acepción que le adscribe Andrónico de Rodas a la *Metafísica* de Aristóteles); por su parte, "*hodós*" significa: "camino". De suerte que, etimológicamente, el método quiere decir, que hay un camino que se va haciendo; que no hay un camino ya preestablecido; es el andar lo que hace el camino, simple y llanamente.

Desde Descartes hasta la fecha, el sentido etimológico de "método" se perderá por completo. Por el contrario, el tema apunta a una búsqueda de seguridades. En efecto, el *Discurso del método* de Descartes no es otra cosa que la búsqueda de una verdad de la cual no quepa dudar en manera alguna. Una verdad semejante se dice que es apodíctica. Así, el método es asimilado a la búsqueda de certezas, seguridades y verdades sobre las cuales no quepa duda alguna. Radicalizando, la verdad se confunde con el camino, y ambos terminan siendo una sola y misma cosa. En lo sucesivo, en la historia de la ciencia –tanto como de la filosofía– e, problema del método deja ser exploratorio, abierto, a la deriva, y se torna en una cierta prescriptiva que garantiza verdades y certezas. Al cabo, el método es científico, y la ciencia termina, así, asumiendo el papel que en la antigüedad tuviera la religión y la iglesia. Esta historia terminará de consumarse con el Círculo de Viena (Stadler, 2010).

Todas las condiciones para una mentalidad positivista, utilitarista, pragmática –tres rasgos de una misma familiaridad–, quedan así sembradas con Descartes con su concepción y preocupación por el método. No en última instancia, el medio termina convirtiéndose en el fin, y se termina cayendo, de esta suerte, en el cientificismo.

En cualquier caso, la ciencia es un invento moderno. Corresponde al tipo de pensamiento, estilos de vida e intereses propios de burgueses en ascenso, tales como Bacon. Descartes (quien jamás tuvo que trabajar gracias a ya muy joven recibió una herencia), Galileo, Kepler, Vesalius, Copérnico y Newton, en una espiral en ascenso que fue haciéndose con base en un criterio determinante, a saber: mientras que la teología como *scientia magna* era una ciencia eminentemente deductiva, la ciencia moderna se hace desde abajo; literalmente, puliendo vidrio (Galileo, Spinoza), abriendo cadáveres y observándolos, ensuciándose las manos; en fin, con base en observación y descripción.

No cabe la menor duda: antropológicamente hablando, la burguesía es aquella clase social que se ensucia las manos trabajando para elaborar un mundo; ni la nobleza ni el clero harían jamás algo semejante. (Posteriormente, la burguesía tendría a alguien más que hiciera su trabajo; esto es, que se ensuciara las manos. Esta clase sería llamada el proletariado, o la clase obrera, y el campesinado).

De este modo, la historia de la ciencia moderna es el proceso, lento y trabajoso, de elaboración de un lenguaje, de postulación de un método, de definición de una realidad, en fin, de desarrollo de una concepción del mundo y la realidad como jamás había existido. Literalmente, la burguesía es la primera clase social en toda la historia hasta ese momento que logra ver el movimiento, pero es porque ella misma introduce el movimiento en el mundo. Es la historia de Marco Polo, Magallanes, Colón y tantos más. El despliegue, con toda su fuerza del capitalismo comercial, incluyendo, naturalmente, la importancia de los piratas y la piratería. Asistimos al nacimiento de la balística, la guerra de los cien años en Europa, la historia del auge holandés y la Armada Invencible, y muchos otros logros semejantes. El mundo empieza a volverse, gradualmente, pequeño.

Pues bien, en esta historia, la ciencia moderna va a inventarse, literalmente, un lenguaje para explicar el movimiento. Este lenguaje es el cálculo –integral y diferencial–, desarrollado paralela pero independientemente por Leibniz y Newton. El cálculo infinitesimal es el primer lenguaje jamás desarrollado que permite ver el movimiento y explicarlo. Los tiempos estaban cambiando de manera fantástica. Posteriormente, el lenguaje del cálculo se complementa con la estadística. Así, cálculo y estadística se convierten en el lenguaje de la ciencia, por distinción.

El gran logro de la modernidad fue, sin la menor duda, y muy de lejos la mecánica clásica. Un refinado, elegante pero simple aparato de explicaciones de a totalidad del mundo y el universo. La mecánica clásica permitió explicar, por ejemplo, las relaciones entre la tierra y la luna, entre la tierra y el sol, y la caída de los cuerpos, como la caída de la manzana, verosímilmente, sobre la cabeza de Newton. El mundo, por primera vez, fue explicado en términos de un sistema de dos cuerpos, y cada uno con su trayectoria. Hasta ese momento, la totalidad de la realidad, el universo y el mundo fueron explicados por un solo cuerpo; por ejemplo, Atenas, o Roma, y demás.

Pues bien, el ascenso de la ciencia moderna ve en la mecánica clásica el aparato más completo posible y lo concibe como el modelo o epítome para cualquier otro tipo de ciencia. Más exactamente, se convierte en el paradigma de la racionalidad científica, *par excellence*. Nace así el fisicalismo, y la física como el modelo de la racionalidad científica. No en última instancia, será la física la que establezca el paradigma de la epistemología. Una teoría cualquier o un cuerpo de proposiciones debe poder ser verificado, confirmado, testeado, y ulteriormente falseado, si quiere sostenerse como un corpus científico. Todas las ciencias que nacen posteriormente a la mecánica clásica nacen a la luz o a la sombra suya, y asumen un espíritu, una actitud o un talante fisicalista.

Ahora bien, una vez que se hubo consolidado la mecánica clásica, con la obra de Newton, nace, especialmente en el siglo XVIII la mecánica estadística. Con los aportes fundamentales de Achenwald y Laplace, y posteriormente de Galton y Pearson, la estadística se convierte en el lenguaje de la ciencia, así: es el lenguaje que san las ciencias para comunicarse, y es

también el lenguaje que usará la ciencia para comunicarse con la sociedad. El mundo se vuelve, mucho antes del nacimiento de la física cuántica, distintivamente probabilístico.

1.4. Una doble nota sobre la ciencia en la modernidad: la biología y la química

Hasta aquí la historia, parcial y resumida de la ciencia moderna, que es, ampliamente, el primado de la física o la mecánica clásica. Ciencia de cuerpos inanes. Sin embargo, dos otras ciencias existen, aunque con mucho menor espacio y prestigio social desde los albores de la modernidad y hasta muy avanzada la misma.

De un lado, se trata de la química, que es, en realidad, la alquimia. Puede decirse, sin ambages, que la química es una ciencia mucho más antigua de la física, incluyendo incluso en ésta a los trabajos de Aristóteles y Ptolomeo, por ejemplo. La historia de la química se remonta al antiguo Egipto, y lega desde la antigua India y China. Sólo que se llamaba, de acuerdo con el nombre árabe heredado, alquimia. Ciencia de las transmutaciones. En verdad, si la física no hubiera triunfado como la ciencia hegemónica en la modernidad, las cosas habrían sido muy distintas. En lugar de pensar en términos de cuerpos y trayectorias, en términos centralizados y jerárquicos, también en términos de causa y efecto, la estructura mental habría sido perfectamente distinta. Pensar en términos químicos significa pensar en procesos, antes que en estados (de la materia), y en relaciones y en términos de teoría de conjuntos. Digámoslo de manera breve pero de pasada: la razón por la que triunfó la física y no la química en la modernidad se debe esencialmente a razones extra-científicas antes que científicas. Al fin y al cabo, mientras que entre los físicos –en sentido amplio– sólo Bruno fue conducido a la hoguera, y Galileo logró salvarse del juicio, los alquimistas fueron duramente perseguidos ya desde la Edad Media; al fin y al cabo siempre se lo asimiló a brujería, herejías y satanismo. Incluso, a pesar de que Tomás de Aquino y su maestro, Alberto Magno también hubieran escrito sobre alquimia. Era sencillamente imposible ser inteligente en la historia de la humanidad y no haberse interesado por los procesos de transformación que comporta la alquimia.

Ya la organización de los elementos era un tema recurrente de estudio entre los alquimistas, y la organización que logra darle Mendeleiev a la Tabla de Elementos fue tan sólo la conclusión de una historia larga. Por razones políticas y religiosas, principalmente, la alquimia desaparece en su discurso o saber, pero logra mantenerse en sus prácticas y habilidades. La historia de la alquimia-química es, humanamente hablando, una historia de mucha violencia, persecución y malentendidos.

De otra parte, la biología era una ciencia con una relativa fortaleza, ya desde la antigüedad. Sin la menor duda, algún aristotélico consumado no dudaría en reconocer que Aristóteles fue un biólogo, mucho antes que un físico, educador o político. Lo que sucede es que el estudio de los animales estuvo proscrito durante toda la Edad Media debido a que el medioevo es una mentalidad teológica fuertemente antropocéntrica. Al fin y al cabo, se trató de entender siempre al ser humano como la mejor creación de Dios. No en vano, en el siglo XII nace el concepto de "persona", en la distinción, en el seno de la cristología, entre a persona divina y la persona humana. Y el estudio de las plantas fue mucho más el objeto de la alquimia y la "brujería" antes que de la teología y la filosofía. Aristóteles, convertido en el filósofo oficial de la cristiandad, enseñó siempre que existen diferencias de naturaleza, y que es imposible que una naturaleza tenga algo que ver con la otra. Imperó la división y la jerarquización. Las plantas jamás ocuparon el primer plano en las preocupaciones del conocimiento, digamos, académico.

Será ya solamente en una modernidad relativamente muy asentada en donde, por primera vez emerja la voz: "biología", que, como es sabido, fue inventada, en su acepción actual, por Lamarck. El terreno quedaba allanado para los trabajos de connotados biólogos, siendo Ch. Darwin el más importante. De suerte que la biología nace muy tardíamente, relativamente a la física, y no alcanza el prestigio y reconocimiento de ésta. S. J. Gould ha narrado muy bien la cantidad de dificultades, obstáculos y avatares que acompañaron a Darwin desde la formulación de su teoría, en 1859, hasta prácticamente comienzos del siglo XXI (Gould, 2004).

Al fin y al cabo, Darwin sitúa al ser humano en un mismo plano con toda la trama de la vida, lo cual constituyó un motivo de escándalo. Tan pronto fue publicado, el *Origen de las especies por medio de la selección natural* fue proscrito e incluido en el índice Romano. Sólo mucho después, en la primera mitad del siglo XX sería sacado de esa lista de libros prohibidos. Digamos en general que todo lo que fuera "vida" o "animado" y que no estuviera bajo la égida de las Iglesias era considerado como rezagos de ese pensamiento organicista propio del medioevo. La vida, como un programa de investigación, sólo sería descubierta o formulada, muy tardíamente, en 1944 gracias a E. Schrödinger, uno de los padres de la física cuántica. Antes, y mientras tanto, siempre prevaleció un dúplice modelo: un universo mecanicista, y una concepción fuertemente antropocéntrica, antropológica y antropomórfica. Pero el ser humano mismo fue siempre, una máquina (Claude Bernard, Quetelet, Marx, Pearson, y muchos otros).



1.5. La ciencia de la revolución industrial

Como quiera que sea, la burguesía triunfa políticamente el 14 de julio de 1789. Su triunfo erigió a los principios de libertad, igualdad y fraternidad como estandartes de la modernidad. Francia dio el ejemplo de que un mundo medieval y feudal podía ser echado abajo. Los demás países de Europa, incluido en América, Estados Unidos, y hasta Rusia –pero con muy serios matices y diferencias–, entendieron el mensaje. El mundo se abocaba al triunfo de la burguesía a nivel global.

Pues bien, el capitalismo comercial cedió al paso a su segundo momento, mucho más tecnificado, el capitalismo industrial. Esto sucedió en la Inglaterra del siglo XIX, y significó, adicionalmente, el triunfo económico de la burguesía. Su estructura mental se afirmó bastante más. Esto es, una concepción del mundo basada en el sentido común, los sentidos, la primacía de la percepción natural, y la reducción del mundo a aquello que se ve, se toca, y se posee. La dignidad de la persona fue una sola y misma cosa con el derecho a la propiedad.

La revolución industrial comenzó con la máquina de J. Watt entre 1763 y 1775. La máquina de vapor cambió el mundo radicalmente. Una parte del movimiento ecologista ha visto en ella el comienzo de la depredación en escala global y sistemática de la naturaleza. La máquina de vapor de Watt se tradujo en el automóvil, el ferrocarril, los motores de todo tipo, las hilanderas, y condujo directamente a la producción en masa. Con ella, en un momento subsiguiente, se produce una de las más desastrosas políticas económicas en toda la historia de la humanidad: la obsolescencia programada. Es decir, literalmente, se le paga a los ingenieros, físicos y diseñadores para que hagan mal las cosas; esto es, para que no duren, y tengan ciclos de vida programados desde su fabricación.

Pues bien, la ciencia de la revolución industrial fue la termodinámica. Y esta puede ser vista –por encima de la química y la biología– como la segunda ciencia de la modernidad. De esta suerte, nace la ingeniería, propiamente dicha, y la física (ciencia) y la ingeniería (tecnología) se refuerzan recíproca y necesariamente.

La termodinámica es una ciencia que tarda casi cien años en nacer, y que se funda en tres principios: primero, la ley de la conservación de la energía, formulada originariamente por Fourier en 1811. Esta será llamada como la primera ley de la termodinámica. La segunda ley es formulada, sobre la base de la máquina de Carnot, por L. Boltzmann en 1854: se trata de la ley de la entropía, y que afirma que todo sistema cerrado o aislado tiende naturalmente al equilibrio. Finalmente, el tercer principio de la termodinámica es formulado en 1876 por Thompson, como la temperatura del universo, equivalente a 0 grados Kelvin equivalentes a -273 grados Celsius.

La ciencia que plasma y al mismo tiempo da lugar a la revolución industrial es, por tanto, la termodinámica. En todos los sentidos de la palabra, la burguesía, que alguna vez había sido una clase revolucionaria (Hobbes, Locke, Diderot, y muchos otros), se vuelve totalmente conservadora. Desarrolla entonces, de consuno, una estructura mental y de gestión del mundo y de la vida fundada en el control y la manipulación. Entre finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX nace la administración, llamada eufemísticamente como administración científica: Ford, Fayol, Taylor y Forrester, principalmente. El mundo se convertirá en lo sucesivo en objeto de administración. Hoy, la administración en general –administración hotelera, gestión, administración hospitalaria, y muchas otras- constituye alrededor del 5% del PIB mundial. Los autores mencionados dan lugar a la segunda revolución industrial.

* * *

Sintetizando, la ciencia clásica o ciencia moderna o también en, otro contexto, la ciencia normal (Th. Kuhn) es, en rigor, la primera revolución científica. Se trató de una revolución que tardó cuatro siglos en llevarse a cabo, desde el siglo XV y XVI hasta comienzos del siglo XX. Esta revolución correspondió al ascenso y triunfo de una clase social. Thomas Kuhn ha llegado a llamar a esta clase de ciencia como "ciencia normal".

Pues bien, lo que peor que se le puede hacer a un ser humano no es callarlo, torturarlo o asesinarlo. Lo peor es normalizarlo. Y hay muchos mecanismos de normalización. La psicología y la educación, notablemente, han sido sensibles y han llamado, adecuadamente, la atención acerca de los procesos, mecanismos y consecuencias de la normalización de los seres humanos. Los seres humanos normales son, para decirlo con Napoleón, "idiotas útiles". Son, para decirlo descriptiva o estadísticamente, sin adverbios ni adjetivos, "el hombre promedio" (Quetelet), o también, "el hombre mediocre" (J. Ingenieros). Sociológica, cultural y estadísticamente, el capitalismo es el triunfo del hombre mediocre. Que es lo que se denomina, eufemísticamente, como la "clase media".

En otras palabras, la ciencia normal tiene de a estandarizar las cosas, habla en términos de medias, medianas y promedios, pero también de vectores y matrices, y entiende y gestiona el mundo en términos de la ley de grandes números. Si el Renacimiento fue el (re)descubrimiento del individuo, el individuo acabara difuminándose en términos de comprensiones estadísticas. Si el cálculo fue el lenguaje que inventó la mecánica clásica para explicar el movimiento, la estadística fue el lenguaje que produjo la síntesis entre la primera revolución científica y la primera revolución industrial. No es gratuito que sus más importantes representantes y fundadores pertenezcan al siglo XIX y la primera mitad del siglo XX. Las expresiones que se introducen y empiezan a manejar y gestionar el mundo son, por ejemplo: regresión lineal, frecuencia acumulada, frecuencia estadística, análisis de varianza, análisis factorial, y otros próximos y semejantes.

Una observación de tipo historiográfico se impone en este punto.

La historiografía ha dejado en claro que el problema de la datación es, hoy, un problema menor, en contraste con toda la historia anterior, en la que los temas de datación sí eran importantes. Por ello, con los problemas de datación emerge, siempre, el problema de los mitos fundacionales. En religión, en política, en economía y en otros ámbitos. La historiografía contemporánea, por ejemplo, ha puesto de manifiesto, por ejemplo, que no es cierto que un siglo comienza en el año 00 y termine en el año 99. Hay, como se ha llegado a reconocer, siglos cortos y siglos largos, por ejemplo. El siglo XX ha sido llamado un siglo corto: comienza en 1914 y termina en noviembre de 1989, con la caída del Muro de Berlín. De la misma manera, hay siglos cruzados. Así, el barroco nace en 1650 y termina en el 1750. De suerte que no es exclusivo del siglo XVII o del XVIII. La lista se puede ampliar a voluntad.

Pues bien, una historiografía de las revoluciones científicas puede sostener, sin ninguna dificultad que la primera revolución científica cubre desde el siglo XV y XVI hasta el año 1905. Ese año nace la física cuántica y se da comienzo a la segunda revolución científica. Podemos girar la mirada en esta otra dirección.

Capítulo 2

La segunda revolución científica y la segunda revolución industrial

La segunda revolución científica puede decirse que comienza en 1905, y se prolonga hasta nuestros días. Si la primera revolución tarda varios siglos en completarse, esta segunda revolución tarda varias décadas en llevarse a cabo. Los tiempos se contraen, los ritmos se aceleran.

En agosto de 1900 Max Planck tiene una intuición. Se sienta, escribe un artículo singular que habrá de romper en dos la historia de la física, y este artículo sale publicado en noviembre del mismo año. Formado en termodinámica, y con su tesis doctoral sobre el mismo campo, Planck venía trabajando, sin embargo en lo que técnicamente se conoce como la radiación del cuerpo negro. Planck era un respetado profesor conocido por sus contribuciones a la termodinámica; sin embargo, el *paper* publicado en noviembre y luego las presentaciones que hizo sobre el mismo ante la Sociedad Alemana de Física (*Deutsche Gesellschaft für Physik*) apenas si merecieron algún comentario. Un profesor tan prominente no podía estar diciendo cosas semejantes. Finalmente, nadie le puso demasiada atención. Cuando se es un profesor con prestigio no se puede salir con cosas desatinadas; lo mejor es el silencio y la prudencia.

Hubieron de pasar cinco años. Un joven físico recién graduado, sin haber podido conseguir ninguna plaza de prestigio como profesor trabaja, por la ayuda de un amigo de su padre en la Oficina de Patentes de Suiza. Es el año 1905. Einstein escribe ese año cinco artículos publicados en *Annalen der Physik* –es su llamado *annus mirabilis*, análogamente a lo que se conocía también con respecto a J. Maxwell, en 1865, cuando Maxwell logra unificar dos de las fuerzas físicas en el electromagnetismo. Pues bien, será este físico joven, entonces perfectamente desconocido, pero sobre quien recaen inmediatamente todas las miradas, quien llamará la atención sobre el descubrimiento de

Planck en 1900. Se trata del hecho de que la energía es discreta, para cuya designación Planck apela al concepto de *quantum*. Einstein asume el descubrimiento de Planck y da un paso adelante formulando la teoría especial de la relatividad con la famosa ecuación: $E = mc^2$, y que quiere significar que la masa y la energía son iguales o equivalentes y que la única diferencia entre ambas es con relación a la velocidad de la luz. En otras palabras, la energía es materia vertiginosa, y la materia es energía lenta. En resumen, la energía y la materia son discretas. Nace, así, la física cuántica. Entonces la comunidad científica se sienta a considerar, más pausadamente pero con mucho interés, el descubrimiento de M. Planck.

Si la mecánica clásica nace a partir del estudio de la caída de los cuerpos, la física cuántica nace a partir del estudio de la luz. El experimento que se encuentra en la base de esta nueva ciencia es el de Th. Young en 1802 (y publicado en 1803) sobre la doble ranura que pone en primer plano el problema acerca de si la luz es corpuscular u ondulatoria, y en el que un fotón de luz interactúa consigo mismo. El artículo original de Young se llamó: *On the Theory of Light and Colours*.

La física cuántica inaugura la segunda revolución científica a partir de un rasgo determinante: en contraste con la ciencia clásica, los fenómenos cuánticos son alta y crecientemente contraintuitivos. De este modo, se empieza a producir un desplazamiento radical de una estructura mental –científica, específicamente-, centrada en la percepción natural, la fuerza de los sentidos y la realidad como tangencial o material, hacia fenómenos y comportamientos que nada tienen que ver con el sentido común. Nuevos lenguajes, nuevos conceptos, nuevas aproximaciones emergen sobre el mundo y la realidad².

Digámoslo de manera escueta: hoy por hoy, muy de lejos, la mejor teoría para explicar qué es el mundo, la naturaleza, el universo, la realidad o la vida es la teoría cuántica. Y esta comienza con la física cuántica. De todas las teorías jamás desarrolladas en la historia de la humanidad hasta hoy, la teoría cuántica es la más testeada, confirmada, verificada o falseada de todas las teorías. Ha sido testeada o conformada hasta el onceavo decimal; es decir, 0.00000000001. No hay absolutamente ninguna teoría, en sentido amplio o restringido que haya sido confirmada o verificada de esta forma. Es sencillamente imposible tener una educación medianamente buena o una cultura básica sin tener algunas ideas básicas, por lo menos, acerca de la teoría cuántica; y con ella, acerca de la física cuántica.

Hablamos de teoría cuántica para designar el hecho de que esta comprende cinco capítulos; estos son, cronológicamente: la física cuántica, la química cuántica, la biología cuántica, todas las tecnologías basadas en principios o comportamientos cuánticos, y

² Al cabo, autores como Capra hacen referencia a conexiones entre física cuántica y pensamiento hindú; Varela con el Dalai Lama (budismo y cognivismo); Matul (mayas y física cuántica).

más recientemente, incluso, las ciencias sociales cuánticas. Lo que la gente normalmente sabe de “cuántica” es básicamente física cuántica; y como veremos seguidamente, sólo el primer período.

La física cuántica tiene dos grandes momentos. Los padres de la física cuántica en su primera fase son conocidos: entre ellos, cabe encontrar a Planck, Einstein (también padre de la teoría de la relatividad), Bohr, Born, Jordan, De Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Dirac y W. Pauli, principalmente. El primer período comprende desde 1900 hasta 1933, que se cierra con un artículo famoso escrito por Einstein, Podolsky y Rosen (el famoso *EPR paper*), llamado: *Can quantum physics be complete?* La razón por la que este primer período se interrumpe abruptamente es por razones extracientíficas: Hitler sube al poder como Canciller alemán, empeiza la persecución también a los científicos judíos, se desencadena la segunda guerra mundial, y tiene lugar el nacimiento de la física atómica o nuclear, a raíz del Proyecto Manhattan, de las bombas sobre Hiroshima y Nagasaki, y la guerra fría subsiguiente entre los E.U. y la URSS, y sus satélites.

El giro de la física hacia la física atómica o nuclear significó la muerte, literalmente de la física cuántica. En 1952 se sabe que no solamente la URSS, que tenía un espía entre los científicos del Proyecto Manhattan disponía también de la bomba atómica, sino, adicionalmente, tiene la bomba H (bomba de hidrógeno), con una capacidad colosalmente más destructiva que la bomba A. La guerra fría generó intereses científicos y de investigación propios.

Sin embargo, gracias, con nombre propio a D. Bohm y R. Feymann, la física cuántica renace de sus cenizas (Gilder, 2008). Con el trasfondo de un científico importante pero conocido sólo por especialistas, A. Wheeler, la física cuántica renace a comienzos de los años 1960s. Bohm hará aportes importantes a la idea de variables ocultas y Feymann habrá de desarrollar la electrodinámica cuántica (*Quantum Electrodynamics*, en inglés; o *QED*), por la cual se hará merecedor del premio Nobel de física en 1965.

Algunos de los científicos más destacados en la segunda etapa de la física cuántica son J. Bell –el padre de la idea de entrelazamiento cuántico–, Fuchs, Zeilinger, Horne, Gisin, y otros. Como habremos de observar más adelante, se producirá un cruce –o complementación–, entre la segunda revolución científica y la tercera. Mientras tanto, cabe considerar con mayor detalle sus características.

2.1. Los llamados principios de la mecánica cuántica

La mecánica cuántica que es el núcleo duro de la física cuántica es, simple y sencillamente, un muy refinado aparato matemático para explicar fenómenos o comportamientos cuánticos (Susskind and Friedman, 2014).

Los motivos que dan origen y alimentan durante un largo tiempo a la física cuántica son tanto científicos como filosóficos. No es clara, en manera alguna, la distinción entre ambos planos. Este es un rasgo fundamental de la segunda revolución científica y su contraste con la primera. Será sólo a partir de 1913 cuando se empieza a formular el aparato matemático que soporta las comprensiones y explicaciones sobre los fenómenos cuántico. Este aparato matemático fue desarrollado originariamente por Heisenberg y perfeccionado por Born y Schrödinger. Hasta el final de sus vidas, las reflexiones de Bohr, Einstein y los demás sobre la física cuántica serán científicos y filosóficos. La matemática es sólo un motivo de comprensión del lenguaje y de las explicaciones.

La física cuántica parte del estudio de partículas subatómicas y los procesos mediante los cuales ganan o pierden energía, llamados saltos cuánticos. La luz es comprendida como una expresión de la energía, y se hace inmediatamente claro que los tipos de razonamientos cuánticos no se fundan en observaciones, sino en consideraciones filosóficas y matemáticas. De manera muy significativa, las matemáticas de la física cuántica son matemáticas de sistemas discretos, en marcado contraste con toda la matemática habida en la historia de la humanidad que fue siempre matemática de sistemas continuos. Más radicalmente, el mundo, la naturaleza, el tiempo y el espacio son comprendidos como lo que son: sistemas, fenómenos o comportamientos que son contables o enumerables, que saben de soluciones de continuidad. En pocas palabras, el tiempo es discreto, el espacio es discreto y la naturaleza y el mundo lo son igualmente.

Vale la pena destacar este aspecto. Toda la historia de la humanidad fue abierta o implícitamente la historia de una cultura, filosofía, religión y ciencia de sistemas continuos. Es decir, en términos elementales, a 28 le seguía siempre 29, a jueves viernes, a la primavera el otoño, y a octubre noviembre, por ejemplo. Por el contrario, con la física cuántica emergen matemáticas de sistema discretos y, para decirlo en términos físicos, la materia, la energía y más tarde también la información serán comprendidas como fenómenos discretos.

Una observación puntual de tipo matemático se impone aquí. La idea de un universo discreto encuentra sus cimientos más sólidos y originarios en la teoría de conjuntos

desarrollada por G. Cantor (1845-1918). Cantor descubre que existe el infinito y, mucho mejor, infinitos infinitos. Que hay unos infinitos más grandes que otros, y que hay también infinitos más pequeños que otros. Ulteriormente, la idea de infinitos infinitos se condensa en el número Aleph –el mismo que recogerá Borges en un famoso cuento (*Aleph*) (2012)-. Si el motivo principal por el que Giordano Bruno fue juzgado y quemado fue su idea de que el universo era infinito (la idea misma de infinito no aparece jamás en la Biblia) quien termina triunfando en la historia es Bruno y no el cardenal que lo juzgó aun cuando a comienzos del siglo XX fuera “elevado” a la categoría de Doctor de la Iglesia.

Digámoslo en términos generales: la cultura, el mundo, la filosofía y la ciencia propios del siglo XX y XXI son, cuando nos situamos en la punta del conocimiento, de sistemas discretos. Jamás, como estructura mental y como comprensión de la realidad y del universo había sucedido una situación semejante. Este elemento aún nos ocupará más adelante.

En cualquier caso, la mecánica clásica puede ser identificada, sin dificultad en una serie de ideas clave, llamadas originariamente como “principios”. Sin embargo, el término mismo no debe prestarse a malentendidos. No se trata, en absoluto, desde ningún punto de vista, de una postura principialista. “Principio” fue, simple y llanamente, la forma como los fundadores de la física cuántica definieron a las ideas pivote de la física cuántica. Estos son:

- *Principio de exclusión.* Formulado inicialmente por W. Pauli en 1925, tiene una expresión técnica, que es la siguiente: no puede haber dos fermiones con un mismo número cuántico en un mismo estado cuántico o en un mismo sistema cuántico. Los fermiones son electrones y quarks. Este principio es determinante para la química cuántica –de hecho Pauli puede ser considerado como el padre de la misma-; más ampliamente, este principio es importante en la química y en la física atómica. En general, un número cuántico es un número asociado a una magnitud física conservada en algunos sistemas cuánticos.
- *Principio de indeterminación.* Formulado por Heisenberg por primera vez en 1927, este principio sostiene que no es posible establecer la dirección –o momento- de una partícula, y el lugar de su ubicación. Radicalmente, se precisa uno o el otro, pero es imposible lograr ambas cosas al mismo tiempo. La incertidumbre es propia a la naturaleza, y no tiene absolutamente nada que ver con el observador.

Una observación importante se impone. El término que usa Heisenberg en el artículo en el que formula este principio es el de *Unbestimmtheit*, que significa, literalmente, indeterminación. Heisenberg no emplea el término de incertidumbre, que también existe en alemán, y cuya voz es: *Unsicherheit*. Los anglosajones tradujeron “indeterminación” por “*uncertainty*”, y así, se generó al cabo mucho ruido. Como si la incertidumbre implicara

rasgos cognitivos o emocionales. Será siempre mejor hablar, por tanto, de principio de indeterminación, y no de incertidumbre.

- *Principio de complementariedad.* Formulado inicialmente por N. Bohr, busca explicar ideas en apariencia contradictorias. La más importante de todas es la dualidad onda-partícula (u onda-corpúsculo). Esta idea afirma que en un fenómeno cuántico es dos propiedades complementarias no pueden medirse simultáneamente y por tanto, el fenómeno considerado puede ser presentado en uno de los dos aspectos. Dos propiedades son complementarias porque no pueden ser captadas al mismo tiempo. Este principio se sigue estrictamente del principio de incertidumbre.
- *Principio de no-localidad.* Este principio sostiene que dos –o más- objetos, sin importar la distancia que los separa, pueden influirse mutuamente de forma instantánea, incluso a una velocidad que puede superar el límite físico de la velocidad de la luz. En otras palabras, la medición de un fenómeno no requiere, para nada, restringirse a una teoría local realista. Toda la historia de la humanidad estuvo marcada abierta o tácitamente por la idea de acción local y de realismo local. Quizás este es el principio más contraintuitivo de todos. Hasta su muerte, Einstein se rebeló constantemente contra el mismo. En la historia de la física cuántica, este tema será contextualizado como el entrelazamiento cuántico, cuyo padre teórico fue J. Bell, pero el más importante de los investigadores es A. Zeilinger.

El primer período de la física cuántica es el más ampliamente conocido. La historia de la ciencia no es nunca llana ni lineal. Mientras estos asuntos se estaban debatiendo, paralelamente ocurría la segunda revolución industrial.

2.2. La segunda revolución industrial

El concepto que condensa mejor la segunda revolución industrial es el de la administración científica. Se trata de la administración del trabajo llevada a cabo entre finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, particularmente en Estados Unidos. Sus padres fueron Taylor, Ford, Fayol y Forrester, principalmente. Se trató de la producción en masa, o también, la producción en serie. En otras palabras, la producción de productos industriales y manufactureros en cadenas de producción –lo cual, económicamente dará lugar a la expresión “la cadena de valor”, para designar el proceso que va desde la producción hasta la venta y consumo de un producto, con los intermediarios y demás-.

Es exactamente en este contexto que nacen los conceptos de eficacia y eficiencia, y la gestión en general está definida por criterios de planeación o planificación. La economía se afirma como un sistema distintivamente productivista. Alrededor suyo, el diseño – industrial, y otros- y la publicidad y la propaganda se desarrollan y conforman un sólido bloque. Es el triunfo total del capitalismo industrial y las semillas del capitalismo post-industrial. Sin metáforas, el producto es producido en cadenas de producción y se basa y apunta a la bonitura. La economía se funda en mediciones de producción y consumo.

Si la primera revolución industrial consistió en el auge de las máquinas de vapor y en general, de las máquinas de todo tipo, la segunda revolución industrial se definió por el control; control de la producción, control del trabajo, control de la eficiencia y la eficacia. Esto es lo “científico” suyo. Es exactamente en este contexto cuando surgen la investigación de operaciones, la ingeniería industrial, la logística, los temas de estrategia y planeación, y no en última instancia, los temas relacionados al liderazgo. En la historia de este tipo de administración habría que mencionar el rechazo que tuvieron los sindicatos por estas formas de gestión, pues implicaban formas más refinadas de sujeción y manipulación de los trabajadores.

Ahora bien, la idea de planeación y administración científica no es exclusiva del capitalismo. En la antigua Unión Soviética también existió un sistema semejante. Los padres de estas ideas fueron Gastev y Stakhanov. Resulto claro, entonces, que ambos sistemas, el capitalismo y el socialismo son productivistas, lo cual se traduce en una instrumentalización de la naturaleza y destrucción del medioambiente. No en última instancia, este es el verdadero núcleo del complejo industrial-militar; sistemas rígidos, verticales, de trabajo y producción masiva, en el que la estructura se impone sobre los individuos y existen en función de la empresa, cualquier que sea su índole. El lenguaje en el que se va sedimentar este tipo de cosas será, en la segunda mitad del siglo XX, el del institucionalismo y neoinstitucionalismo.

Como se aprecia, mientras que en un plano se hace ciencia de punta, de carácter verdaderamente revolucionario, paralelamente, y de forma independiente, tiene lugar la segunda revolución industrial, de carácter eminentemente conservador, y como refinamiento y depuración de la primera revolución científica y de la primera revolución industrial. Esta observación merece destacarse, de la siguiente manera: no existe una relación uno-a-uno entre revoluciones científicas y revoluciones industriales. Ambos tipos de revoluciones son, si cabe la metáfora, los parámetros dentro de los cuales tienen lugar diferentes dinámicas. Dicho de forma genérica, la ciencia y la tecnología son, en ocasiones, catalizadores de procesos, y en oro momentos, los elementos centrales y protagónicos de las dinámicas mismas.

En fin, la producción industrial o en serie termina siendo equivalente a, o expresándose como, el modelo pedagógico enfocado en competencias, habilidades y destrezas. La

educación termina, en sus diferentes niveles produciendo cohortes, un concepto en verdad horroroso, que es como decir sacar paquetes profesionales. Entre tanto, los profesores tienen cubículo, y termina ajustándose a un modelo productivista – *avant la lettre*, o bien, asimismo, *après la lettre*.

2.3. El carácter contraintuitivo de la segunda revolución científica

La segunda revolución científica transformará, ciertamente de manera lenta y pausada, la vida social y cultural de la humanidad. Algo que continúa sucediendo a la fecha; esto es, en otras palabras, se trata de una revolución todavía en vías de efectuación.

Son varias las ideas que cabe destacar acerca del carácter contraintuitivo de la teoría cuántica, y que permiten establecer, sin ambigüedades, por qué es una revolución científica. Mientras no se la observa, una partícula se encuentra en todas partes. Es sólo cuando se la observa que está en un lugar determinado. Esta idea es conocida como decoherencia cuántica. El mundo cuántico es decoherente en el sentido de que en él todas las posibilidades suceden al mismo tiempo. Como lo expresará Schrödinger en el famoso experimento mental, el gato está vivo y muerto al mismo tiempo. Es el acto de medición o de la observación lo que convierte al mundo cuántico en el mundo clásico; exactamente ese mundo regido por el principio de tercero excluido formulado por Aristóteles; esto es, es imposible que una cosa sea ella misma y su contrario al mismo tiempo. El mundo clásico es analítico.

Es fundamental observar lo siguiente: no existe en absoluto ni una sola palabra, en el corpus de los padres de la física cuántica que diga algo como que ésta se ocupa exclusivamente de partículas subatómicas y de nada más, o que excluya explícitamente que fenómenos macroscópicos queden excluidos de las consideraciones de la física cuántica. Mucho mejor que decir que la física cuántica se ocupa de volúmenes, masa o tamaños, ésta se ocupa de tiempos: tiempos que cabe decir como microscópicos, que son verdaderamente vertiginosos, y su relación, entonces, con los tiempos macroscópicos. Me he ocupado de este tema en otros lugares (Maldonado, 2019a).

Hay dos reconocimientos perfectamente entrelazados que son determinantes: de un lado, es el hecho de que la explicación cuántica del mundo y la naturaleza es propicia –en notable contraste con la mecánica clásica tanto como, al mismo tiempo, con la teoría de la relatividad–, para comprender por qué razón es posible la vida (McFadden y Al Khalili, 2019). De otra parte, es sólo gracias a la revolución que significó la física y la química cuántica por lo que fue posible el descubrimiento del problema de la vida

como un programa de investigación científico. Dicho de manera escueta y directa: sin la cuántica habría sido imposible el descubrimiento del problema de la vida; punto. De esta suerte, por primera en la historia de la humanidad, se comienza a abandonar una dúplice perspectiva hasta entonces dominante: una comprensión del mundo como inane –o regida por principios divinos o también mecanicista-, y una comprensión, consiguientemente, típicamente antropocéntrica, antropológica y antropomórfica (Botkin, 1990).

Huelga subrayar que la vida es un fenómeno esencialmente contraintuitivo. A la vida no se la ve propiamente, y claramente no con los sentidos o la percepción natral. A la vida se la imagina, o se la experimenta – desde adentro.

Simple y llanamente, la física cuántica facilita que la vida pueda existir. La vida es un fenómeno fundamentalmente metabólico, y como lo afirma un investigador: "...la potencia liberada por el Sol por unidad de masa es unas cien veces inferior a la energía metabólica que desprende una célula biológica, ya que una gran parte del Sol no produce energía, sólo la transmite" (Jou, 2012: 74).

En otras palabras, la vida es el proceso mediante el cual la propia vida genera sus condiciones de aparición y transforma elementos y procesos abióticos en procesos bióticos. La vida nace ya compleja, con una complejidad mínima, y va ganando en complejidad. Este proceso de biogénesis no es agregativo ni composicional; por el contrario sucede en la forma de síntesis y con base en la esencia misma de las matemáticas de sistemas discretos: que es la combinatoria. Ya volveremos sobre esta idea. La cuántica sienta todas las bases para una estructura relacional o nodal en la comprensión del universo y la realidad. Toda la tradición fundada en la causalidad estalla, aquí en mil pedazos. La cuántica no sabe de causalidad.

Al mismo tiempo, y sobre la base de lo que precede, es posible sostener sin la menor duda que la realidad no sucede según una sola historia. Esto fue lo que hicieron creer la ciencia, la filosofía, la religión y toda la tradición desde siempre. Antes bien, la realidad tiene lugar en una superposición de todas las historias posibles. Pero si ello es así, entonces el reduccionismo –es decir. Reducir la realidad a una sola historia, cualquiera que sea- se revela como limitado e ignorante. De este modo, pensar bien es pensar en todas las posibilidades, no porque alguna de ellas tiene lugar o tiene lugar, sino porque todas tienen lugar y cualquier puede saltar al primer plano. Pensar, al cabo, no es determinar los fenómenos, sino, mucho mejor y más radicalmente, indeterminarlos. Una idea perfectamente contraintuitiva cuando se la sopea con toda la tradición.

(Entre paréntesis, quien pareciera resultar más sugestivo, de la tradición, no son Sócrates o Platón o Aristóteles, y ni siquiera Parménides o Heráclito, sino alguien aún más desapercibido: Anaximandro, y la idea del *apeiron* –la indeterminación o lo indeterminado, lo indefinido y por derivación infinito, en fin, lo que carece de límites). Podemos decirlo

desde ya: pensar en términos de complejidad significa exactamente indeterminar los fenómenos. La dificultad de esta estriba en que nada en toda la historia habida hasta la fecha permitió acercarnos o prever este reconocimiento. Toda la historia anterior es una historia de determinaciones y determinismos, consecuentemente.

De manera muy significativa, subsiguientemente, la cuántica permite aprender a pensar que lo más importante en ciencia o en la vida no es la predicción. El mundo cuántico está marcado, transversalmente por la aleatoriedad. Es un mundo de posibilidades, mucho más y mucho mejor que decir un mundo probabilístico. Como lo afirman dos autores dedicados a la física y al estudio de fenómenos cuánticos, "todo lo que puede suceder, sucede" (Cox y Forshaw, 2015); no porque deba suceder; porque puede hacerlo. En otras palabras, con la física cuántica dejamos de pensar en necesidades –como en la ciencia clásica-, cuanto que en libertad. Exactamente en esta dirección, la complejidad de un fenómeno puede ser comprendida en términos directamente proporcionales a los grados de libertad que tiene o que exhibe dicho sistema.

El universo o la realidad es la superposición permanente de todas las cosas que pueden suceder; y puesto que vivimos en un universo cuántico, lo más sensato es sumar todas las posibilidades. En otras palabras, la dimensión de lo conocido no es la de la investigación, el conocimiento y la reflexión. Muy por el contrario, es la esfera de lo desconocido. La ciencia, como la vida, se mueve de lo conocido hacia lo desconocido. He aquí una idea nuclear. El contraste con toda a tradición es fuerte y marcado.

Puntualicemos lo siguiente: la cuantización del mundo y de la realidad significa sencillamente que las cosas tienen valores concretos, nunca más o menos. Así las cosas, lo cuántico significa lo contable o numerable, pero esto concreto o contable o numerable existe en relación o también, en un campo determinado. Los hechos cuánticos tienen lugar sin ninguna necesidad; simple y llanamente acontecen; son eventos (Ball, 2018).

El mundo es esencialmente cuántico. Lo que sucede es que los seres humanos forman parte del mundo clásico, o ven al mundo de forma atávicamente clásico. Pues bien, las diferencias –o también, las relaciones-, entre el mundo cuántico y el mundo clásico son graduales, de umbrales, jamás abruptas y como fronteras rígidas y definidas de manera firme. El mundo acaece, sencillamente, como umbrales, series de *degradés*, en escalas crecientes o decrecientes. Análogamente a lo que acontece entre la lucidez y la locura, la salud y la enfermedad, la vida y la muerte, la pobreza y la riqueza, y así sucesivamente. En otras palabras, la física cuántica enseña a pensar en procesos, o lo que es equivalente en grados o gradientes, jamás en reinos. Un rasgo de fineza y sensibilidad, como en la música o en pintura, en poesía o en culinaria (= alquimia).

En otros términos, el mundo clásico es sólo un caso límite del mundo cuántico. La fuerza, la tradición y la impronta de la percepción natural va quedando relegada en el proceso de formación del espíritu; aquí, mediante la ayuda de la física cuántica.

2.4. Temas recientes de punta de la revolución cuántica

Los temas más sobresalientes de la segunda revolución científica son el entrelazamiento cuántico, la teleportación –llamada también en ocasiones teletransportación–, y la computación cuántica y con ella, la criptografía cuántica. Sorpresivamente, frente a la tradición que se encarna en Einstein, todos apuntan a la superposición y la no-localidad.

Empíricamente, y se ha establecido ya el entrelazamiento entre más de dos cuerpos. La China anunció en un informe reciente que ya ha sido posible el entrelazamiento a una distancia de 1.200 km (cfr. <http://www.parabolicarc.com/2019/06/19/china-quantum-satellite-establishes-photon-entanglement-1200-km/>). La teletransportación es más que teletransportación de cuerpos o masas, de información. (En verdad, las cosas mismas, mucho mejor que masa o energía son, adicional y fundamentalmente, información. Algo que se entenderá mejor con la tercera revolución científica). Por primera vez, en diciembre de 2019 científicos lograron la teletransportación entre chips de computadores (cfr. <https://www.sciencealert.com/scientists-manage-quantum-teleportation-between-computer-chips-for-the-first-time>). Y asimismo, la criptografía cuántica es el núcleo duro de un tema técnico: la computación cuántica. Los más sensibles asuntos relativos a seguridad, privacidad, habeas data y otros próximos y semejantes están insertos en este capítulo (cfr. <https://cs.stanford.edu/people/adityaj/QuantumCryptography.pdf>).

En cualquier caso, criptografía cuántica, computación cuántica, portanto, teletransportación y entrelazamiento se encuentran estrechamente entrelazados. Lo que emerge con ellos es, en realidad, la tercera revolución científica.

Capítulo 3

La tercera revolución científica y la tercera revolución industrial

El siglo XVIII se inventó un concepto novedoso hasta entonces y explicó la totalidad del universo en términos suyos: la masa. Esta es la historia de la mecánica clásica. Todo lo que sucede en el universo es el resultado: a) de masas más pequeñas y más grandes. Toda masa más pequeña siempre será atraída por un cuerpo con una masa mayor. Los cuerpos se mueven libremente en el espacio de forma inercial; hasta que se encuentran con una masa mayor. Y finalmente, los cuerpos interactúan entre sí en términos de acción y reacción. Toda reacción es inversamente proporcional a la acción ejercida inicialmente. El elemento novedoso, *ad hoc*, que introduce la física clásica para explicar las dinámicas y trayectorias de y entre los cuerpos es el de fuerza. Newton jamás definió o explicó la fuerza. La introduce como un elemento *ad hoc*; en el mejor de los casos es una metáfora. La ciencia de las masas es la física clásica.

El siglo XIX introduce un concepto perfectamente novedoso que explica mucho más y mejor que o que hacía el concepto de masa. Se trata del concepto de energía. Sin embargo, mientras que la masa es unívoca, y sólo se entiende en términos de mayor o de menor masa, el concepto de energía es polisémico. Así, existe energía térmica, calórica, química, potencial, mecánica, cinética, informacional y otras más. La ciencia de las energías es la termodinámica, o también, la química.

Pues bien, el siglo XX se inventa un concepto que explica aún mejor lo que explicaba la energía que explicaba mucho mejor lo que hacía la masa. Se trata del concepto de información. Es este concepto el que gatilla, por así decirlo la tercera revolución científica, que consiste en la teoría de la información. Esta idea puede condensarse en la siguiente ecuación:

* * *

Una fantástica revolución sucede al interior misma de la física, y de la forma como la ciencia física entiende a la física de la realidad. Dicho genéricamente, las cosas, antes que cuerpos o masas son energías; y a su vez, antes y más que energías, son información. Nace la teoría de la información, y con ella, la tercera revolución científica.

La tercera revolución científica tiene inicio con un artículo publicado en dos partes en 1948 por Shannon y Weaver: la teoría de la información. En inglés, la teoría de la comunicación: *A mathematical theory of communication* (Shannon, 1948), (Shannon era el profesor, y Weaver el alumno).

Con un aspecto verdaderamente determinante, a saber: mientras que la masa es tangencial –se la coge, se la sopesa, etc.–, y la propia energía se la puede ver y sentir –la electricidad, el magnetismo, por ejemplo–, la información es un fenómeno físico pero que no es materia, o tangencial. A la información no se la puede ver en el mismo sentido que se ve a los cuerpos físicos. Este es su rasgo más determinante. Por derivación, hay fenómenos físicos que no son materiales. Una idea sin parangón en toda la historia de Occidente, y que va a abrir nuevas y muy refrescantes luces acerca del mundo y la realidad.

La información no es un objeto o una cosa: es lo que une a las cosas y a los seres humanos, por ejemplo. La información –por ejemplo, las tecnologías de la información–, no son los teléfonos celulares, los computadores y demás. Esos son sencillamente los aparatos a través de los cuales fluye la información. La información es lo que sucede entre, y unifica (o distancia) a los seres vivos, los fenómenos y n sistemas del mundo y la naturaleza. Quizás su rasgo más importante es la no-conmutatividad. Es de esta forma, ulteriormente, como se estructura toda la información en el universo.

Una precisión se hace necesaria: si la primera revolución científica tarda varios siglos, la segunda revolución científica tarda varias décadas; queda dicho. Pues bien, la tercera revolución científica tarda varios años. Los ritmos de avance del conocimiento son verdaderamente hiperbólicos.

3.1. Lógica y economía de la información

La comprensión o explicación de un fenómeno es directamente proporcional a la información necesaria para expresarlo. De esta suerte, la información implica al mismo tiempo compresibilidad y capacidad expresiva. A partir de esto puede entenderse la idea de entropía informacional, quizás la más importante de este revolución científica.

Si la termodinámica clásica entiende a la entropía como una medida de desorden, la teoría de la información pone de manifiesto que la entropía informacional se corresponde con incertidumbre –esto es, ambigüedad, ambivalencia, o ruido; para el caso, son equivalentes. En otras palabras, la información es sorpresa. A mayor sorpresa y asombro, mayor información; por el contrario cuanto más redundante sea un fenómeno, menor será la información que contenga y que sea necesaria para explicarlo o comprenderlo. La teoría de la información dará lugar, particularmente gracias a Chaitin y a Kolmogorov, por caminos independientes, a la teoría algorítmica de la información (AIT, por sus siglas en inglés). Sencillamente, para obtener información de un sistema es indispensable reducir su entropía.

La teoría de la información es el resultado de dos elementos claves de la cultura y fuertemente entrelazados: las tecnologías de la información, en el sentido más amplio de la palabra, y las matemáticas. El más importante de las tecnologías de la información es el computador. Y la matemática es, subsecuentemente, matemática de sistemas computacionales. Desde el punto de vista teórico, se trata de la conjunción entre las ideas y contribuciones de A. Turing, y las de Shannon y Weaver. Esta síntesis resultará en el despliegue de la inteligencia artificial y la vida artificial; y con ellas, de todas las formas más sutiles y sofisticadas de robótica. Todo ello habrá de conducir al mundo actual, con los desarrollos de la web 2.0, 3.0, 4.0 y la 5.0 previsible hasta el momento, el desarrollo de la web profunda en internet (*deep web*), las tecnologías 3G, 4G y 5G en curso. Con todo y sus aplicaciones y desarrollos en ciencia y en la vida cotidiana. Desde el punto de vista teórico o conceptual, los temas que emergen son, necesariamente, los de complejidad algorítmica, aleatoriedad algorítmica y el de probabilidad algorítmica. Como se aprecia sin dificultad, nuevos lenguajes emergen, que hacen posibles nuevas realidades. Esta es ciencia de punta, en toda la acepción de la palabra (Gleick, 2012).

El objeto de trabajo de la teoría de la información es, si cabe decirlo así, medir y descartar la entropía informacional. Esto es, eliminar la incertidumbre en un mensaje. En un conjunto posible de diferentes mensajes, un mensaje en particular reduce su entropía. La consecuencia es asombrosa, a todas luces: los sistemas vivos contribuyen a reducir la entropía del universo. Esta es su lógica y su economía en el universo. Dicho, en lenguaje llano, la vida elimina el ruido del universo y entonces le confiere, por ejemplo, sentido, significación y, mucho mejor aún, un signo distintivo. Ello, sin embargo, debe ser completamente descartado de cualquier inclinación a formular o aceptar algo así como el principio antrópico; es decir, que el universo fue diseñado para que la vida y los seres humanos aparecieran en él.

Los sistemas vivos organizan el mundo, y lo organizan de una manera bastante mejor que si no estuvieran en él. Sólo que la dinámica de los sistemas vivos es la evolución, y por tanto, la inestabilidad. Los sistemas vivos se nutren de entropía y por ello mismo reducen y mantienen baja la entropía del universo. Un resultado maravilloso.

Un científico importante procedente de la segunda revolución científica pero testigo de la tercera revolución científica lo expresará de forma sintética como jamás nadie pudo hacerlo mejor: A. Wheeler. De acuerdo con Wheeler: las cosas son en realidad información. Pero la información misma es información cuántica, en cuanto que ya no se trata sencillamente, por ejemplo de ruido-o-información, sino de la coexistencia entre verdad-y-falsedad al mismo tiempo, dicho en un lenguaje elemental. Dice Wheeler: *it (comes) from bit (comes) from qubit*.

En otras palabras, existen entrecruzamientos múltiples entre la segunda y la tercera revolución científica, pero entonces, también, muy fuertes quiebres, rupturas y distanciamientos con respecto a la primera revolución científica. La teoría cuántica y la teoría de la información se implican cada vez más. El resultado será la *teoría cuántica de la información*; o lo que es equivalente, el *procesamiento cuántico de la información*. Este es exactamente el momento en el que nos encontramos hoy en día.

El mundo entero está escrito en algún tipo de código o, incluso también, en diferentes sistemas de código. Si es así, debe ser posible leer e interpretar, por decir lo menos, esos diferentes códigos.

Esta es la idea que se encuentra en la base del descubrimiento de la estructura del ADN por parte de Watson y Crick, y que permite descubrir el alfabeto de la biología molecular. Lo que sucede en los cuatro pares básicos de genes –A, C, T, G: adenina, citosina, tiamina, y guanina- son básicamente sistemas de información y de codificación, que cuando funcionan bien dan lugar a la vida y la salud; y cuando o, aparecen las patologías y enfermedades. La derivación de esta idea conduce la genómica, y finalmente a la biología de sistemas: que son, en verdad, redes de información en cada escala o nivel: lipidómica, glucómica, metabolómica, proteómica, transcriptómica, interactómica, y varias más. La vida es un fabuloso sistema de sistemas – de información y redes de información.

Puesto en términos básicos, es posible sostener, sin ambages, que la vida consiste en procesos de procesamiento de información crecientemente complejos, de tal suerte que a mayor complejidad, mayor vida; o lo que es equivalente, a mayor información, mayor vida. En otras palabras, podemos hablar perfectamente de sistemas de *complejidad creciente*, y lo que establece exactamente esta complejidad es la cantidad de información disponible y, concomitantemente, la capacidad de procesamiento de la misma. Un autor lo pondrá en los siguientes términos: la juventud y la salud consisten en la capacidad para procesar nueva información disponible; pero en el momento en que se hace difícil el procesamiento de nueva información empieza la vejez y se acaba en la muerte (Vedral, 2010). No en última instancia, el universo mismo es un sistema de información cuántico, o lo que es lo mismo, un gran procesador cuántico de información. Exactamente como la vida (Maldonado, 2018a).

Recabemos en lo siguiente: cuanto mayor regularidad haya en un mensaje, es tanto más predecible; cuanto más predecible sea, será más redundante. Pues bien, entonces dicho mensaje contendrá menor información. La traducción de esta idea no admite dilaciones: la riqueza de la información es directamente proporcional a la ausencia de predictibilidad, es decir, a su mayor aleatoriedad y ausencia de algoritmos. En una palabra, la vida es un sistema no-algorítmico, y por ello mismo es libre y carente de restricciones; o un fenómeno de incesante negación de límites y bordes. Aquello que define a los sistemas vivos puede ser dicho de tres maneras equivalentes, así:

- Los sistemas vivos son neguentrónicos; esto es, niegan la entropía incesantemente
- Los sistemas vivos viven alejados del equilibrio o, lo que es equivalente, en el filo del caso
- Los sistemas vivos son no-algorítmicos; es decir, no obedecen, y no se reducen a, reglas, normas, algorítmicos, recetas o cosas semejantes.

Tres ideas fuertemente entrelazadas; tres maneras de decir una sola y misma cosa. En esto consiste exactamente la complejidad. Por esta misma razón, las ciencias de la complejidad son ciencias de grados de libertad, o de vida, lo que es igual. Como lo afirmara uno de los más importantes científicos o teóricos de la complejidad: a cada paso hay solo un fino cabello de distancia entre lo "trivial" y lo "imposible". Cuanto más simple sea un fenómeno, menor información posee; por el contrario, cuanto más información posea será más complejo. Así las cosas, la complejidad es directamente proporcional a la información, y concomitante y necesariamente, al procesamiento de la misma. Como se aprecia sin dificultad, tres ideas aparecen como fundamentales, fuertemente entrelazadas: complejidad, información y aleatoriedad.

3.2. El mundo como información

El mundo es un entramado (= tejido) de signos y señales. Lo que hace un científico o filósofo es exactamente lo mismo que hace un chamán: leer los signos de la naturaleza e interpretarlos adecuadamente. Algo que se dice fácilmente, pero es sumamente difícil de llevar a cabo. Mucha educación, mucha información, mucha formación e investigación son necesarias para ello.

El mundo de los signos es abierto y relacional – en marcado contraste con el mundo de los símbolos, que es siempre autorreferencial y jerárquico. Los sistemas humanos saben de símbolos, en verdad. La naturaleza, por el contrario, es un sistema continuamente

cambiante y abierto de signos. El tema que emerge aquí es el de la biosemiótica; una de las ciencias de la complejidad, cabe decir.

Si bien es cierto que la teoría de la información tiene varias avenidas muy técnicas, es igualmente posible destacar diversos caminos acerca de sus implicaciones culturales e históricas. El más importante de éstos es el reconocimiento de la emergencia de un nuevo momento en la historia desde la modernidad. Este momento adquiere inicialmente el nombre de “sociedad de la información”, cuyo mejor estudio, sin duda, lo lleva a cabo M. Castells (2005). Es a la luz de esta idea como cabe hacer referencia a la tercera revolución industrial.

Si bien los computadores tienen una historia que pivota alrededor de la segunda guerra mundial, con el Eniac I y II, y otros (Isaacson, 2014), social o culturalmente hablando el computador es una realidad cotidiana para los seres humanos hacia finales de los años 1980s. Es a partir de ese momento cuando comienza el tránsito de un mundo analógico a un mundo digital. En términos generales, comienzan a nacer temas como: teletrabajo, digitalización, gobierno en línea (*e-government*) y más adelante, (grandes) bases de datos, entre otros aspectos. Es tan sólo unos pocos años después cuando se proclama la tercera revolución industrial. El padre del concepto es J. Rifkin (2011). Es, exactamente, la revolución de internet, y todo lo que la red comporta.

Como se aprecia sin dificultad, la sociedad en red (Castells), la importancia creciente de las tecnologías de la información y la comunicación, y su impronta en la economía y a sociedad (Rifkin) se encuentra perfectamente conectadas. Es apasionante, y siempre posible leer las emergencias de procesos, dinámicas y estructuras novedosas. La buena ciencia no va a la zaga de los acontecimientos y de la realidad; mucho mejor, anticipa futuros, proyecta presentes, concibe y tematiza posibilidades. Se trata de todo un giro verdaderamente cultural y civilizatorio.

Sin la menor duda, la tercera revolución industrial establece una muy fuerte ruptura con respecto a la primera y a la segunda revoluciones industriales. Se trata del reconocimiento explícito de la distribución – del trabajo, de los procesos, de la sociedad. Es exactamente lo que significa internet. No en última instancia, por primera vez en toda la historia de la humanidad, el conocimiento no pertenece ya a nadie –individual o colectivamente- en particular. Se convierte en un acervo de todos. La distribución, y no ya centralización ni jerarquización de la vida social, en toda la gama de la palabra, es algo que jamás había existido en la historia de la civilización occidental; por decir lo menos.

Pues bien, hay dos conceptos adicionales que vienen a agregarse a la sociedad de la información; son la sociedad del conocimiento y la sociedad de redes – tres nombres o momentos diferentes para una sola y misma dinámica.

A fin de entender lo anterior, cabe un comentario adicional. Castells sostiene dos ideas clave sobre este punto (Castells, 2005). De un lado, afirma que el capitalismo industrial y postindustrial –éste último es el que tiene lugar en los años 1960s-1980s, que es cuando emerge específicamente el capitalismo financiero-, se transforma en capitalismo informacional no porque fuera una alternativa o una posibilidad, sino como el único giro posible si el capitalismo quería seguir existiendo. Y en el mismo, sentido, que la sociedad de la información es el resultado de la emergencia de una nueva clase social. Esta se caracteriza por que no tiene los medios de producción y no necesita tenerlos para generar la riqueza de la nueva sociedad. Pues bien, la riqueza de la sociedad de la información –o del conocimiento o de redes- es lo que puede comprenderse como el “capital relacional” o, lo que es equivalente, por la producción de información y conocimiento.

Existe, ha emergido, efectivamente, una nueva clase social. Castells, afirma que no le tiene nombre a esta nueva clase social; ella es la productora de información y conocimiento; y para ello no es necesario poseer los medios de producción, en absoluto. El nuevo capital es la información o el conocimiento; no ya el dinero, las máquinas o los trabajadores y obreros que se posee o que se controla. Con aportes diferentes, U. Beck, S. Sasses y Z. Bauman afirman, cada uno por aparte, que sí le tienen nombre a esta nueva clase social. Manifiestamente, no es ya del tipo plebeyos, campesinos, obreros, o proletariado. Existe una clase social que vive de generar información y conocimiento. Y permite, así, nueva calidad de vida y nuevas formas de dignidad humana. El horizonte de es todas estas consideraciones, sin embargo, ya no es el propio ser humano. Mucho mejor, es la vida en general: la vida tal-y-como-la-conocemos, tanto como la vida tal-y-como-podría-ser- posible (*life as it could be*).

Pues bien, por decir lo menos, se trata de una nueva clase social que conoce muy bien los detalles de la teoría de la información, en toda la extensión de la palabra. Al respecto se impone una precisión.

De acuerdo con la Unesco, la principal forma de analfabetismo contemporáneo es el analfabetismo tecnológico. Dicho de manera puntual, se trata del analfabetismo: a) de lo que son las tecnologías convergentes; b) de cómo trabajan y cuál es su lógica.

Las tecnologías convergentes –no ya simplemente las TICs-, son las tecnologías específicas del siglo XXI. Se trata de las tecnologías NBIC+S, así: la nanotecnología, la biotecnología, las tecnologías de la información, las tecnologías del conocimiento y la dimensión social de las nuevas tecnologías. Dicho de manera puntual, se trata, ulteriormente, de la capacidad para leer y para escribir código – computacional. Una manera precisa de decir esto es la siguiente: la diferencia entre lo nativos digitales y los inmigrantes digitales estriba en que los primeros no solamente entienden qué son las nuevas tecnologías, sino, mucho mejor, son capaces de escribir código; esto es saben lenguajes de programación. Con los lenguajes de programación, pueden modelar y simular. Los que no pertenecen a

esta categoría, se sirven, en el mejor de los casos del aprendizaje de máquina (*machine learning*), que es la forma como actúa la web 2.0, y 3.0. Y los grandes motores de búsqueda en internet: google chrome, safari, bing, y otros.

La más fuerte conclusión emerge en este punto. Mientras que toda la historia de la humanidad se caracterizó por el miedo o la sospecha o el encerramiento de la información y el conocimiento; su confinamiento, digamos. Hoy, si metáforas, vivimos un mundo rico en datos, ticos en información, rico en conocimiento. Y el futuro se asemeja mejor gracias a más y mejor información, más y mejor educación, más y mejor conocimiento e investigación. El proceso más apasionante es, hoy por hoy, la de la emergencia, constitución y fortalecimiento de redes: redes de colaboración, redes de aprendizaje, redes de conocimiento.

Así, toda la historia de la logofobia queda claramente atrás; la logofobia: esto es el miedo al conocimiento, del tipo “de este árbol no comerás”, y otras formas semejantes. El conocimiento es hoy, por primera vez, un acervo común para toda la humanidad. Cada vez se impone más la idea acceso abierto (Open Access). En 1998 aparece por primera vez el concepto de grandes bases de datos; hacia el año 2010 nace la ciencia de grandes bases de datos (big-data science). Diversos lenguajes de programación permiten trabajar con ellos, y novedosas herramientas, estadísticas y de otro tipo permiten trabajar con ellas. En su base, como condición mínima se encuentra la minería de datos (data mining). Vivimos, literalmente una época de luces, de mucho conocimiento. Al aprendizaje de máquina le ha sucedido el aprendizaje profundo (deep learning), que permite explorar bases de datos de forma cruzada o transversal y no ya solamente por contigüidad. Un horizonte rico emerge ante la mirada. Internet a pesar de todas las pretensiones de diferentes gobiernos variopintos, no puede ni podrá ser controlada. Al fin y al cabo, el nacimiento de internet es la primera tecnología de origen no militar o belicista en toda la historia de la humanidad. El lugar de su nacimiento fue el CERN (Centro Europeo de Investigación Nuclear), un centro de investigación de punta en el que participan más de 100 países del mundo y más de 3000 investigadores.

Manifiestamente, vivimos una época de mucha información, mucha educación, mucha ciencia y tecnología; pero aún no de mucha sabiduría. Este es exacta e inmediatamente el horizonte de reflexión y tematización que surge inmediatamente. La dificultad grande estriba en el hecho de que la sabiduría no se enseña, no se anuncia, y no hace de sí misma una bandera. Nos encontramos ante un giro civilizatorio en la historia de la humanidad. La nueva civilización en emergencia –para la que aún no hay un nombre³–, hará, muy verosímilmente, de la sabiduría un asunto de interés común. La diferencia con el pasado

3 Vale recordar que la Modernidad no accedió a su propio nombre sino muy tarde; apenas en el giro del siglo XVIII al siglo XIX.

estriba en que esta sabiduría ya no será individual o personal (o personalizada), sino el logro de un esfuerzo mancomunado.

3.3. Naturaleza de la información

La masa es inerte. De acuerdo con Newton, todo lo que le sucede a la masa es resultado o bien de la inercia –una idea que fue desecha por la teoría de la relatividad de Einstein-, o bien de la acción de fuerzas, siendo la más importante la gravedad. La mecánica jamás explicó en qué consistía la “fuerza”. Gracias a la física cuántica, al cabo, el concepto de “fuerza” desaparece en la física. Las fuerzas son sencillamente el resultado de las interacciones de las partículas subatómicas y del intercambio de unas por otras. Mucho mejor aún, el concepto de “fuerza” desaparece dando lugar a la idea “campos”: campos electromagnéticos, campos gravitatorios, por ejemplo.

Por su parte, el concepto de energía presenta una cierta ambivalencia. Si bien la energía es dinámica –excepto, siempre, la energía potencial-, la dificultad, teórica y práctica, es que una vez que se genera la energía es muy difícil almacenarla o contenerla: hay que ponerla a circular. La energía hace cosas. El reto que plantea es el de la entropía.

Pues bien, el concepto de información es esencialmente dinámico. La información cambia a las cosas. Naturalmente, la información puede ser creada, transmitida, almacenada, compartida, extraída, y no pesa nada. Manifiestamente no pesa nada cuando se la compara en términos de masas (gramos, kilogramos y demás). Precisamente por ello se introducen nuevas mediciones de información: bit, megas, gigas, teras, petas y otras más. Las cosas pesan en información, pero ya no más en peso físico tradicional. Y muy significativamente, la información es procesada.

En verdad, la información no existe antes de ser procesada, y tampoco existe después. Sólo existe en tanto en cuanto es procesada. El procesamiento de la información consiste en que ésta hace cosas y a su vez, por tanto, transforma las cosas. La forma más elemental de entender esto es que el procesamiento de la información transforma datos en conocimiento. El input –datos- es perfectamente diferente (= no proporcional) a los outputs (= conocimiento), y lo que media entre ambos es, a su vez distinto: información siendo procesada.

En otras palabras, lo verdaderamente determinante de la información es el resultado que produce. Información que no produce ningún efecto es trivial. De esta suerte, la complejidad de un fenómeno es directamente proporcional a la información que tiene o produce. Información, complejidad y organización son conceptos que se implican entre

sí, necesariamente (Roederer, 2005). En verdad, si el concepto mismo de "organización" nace en la biología, gracias a Lamarck, a fin de distinguir y superar el problema de las relaciones entre la vida y la no-vida –la vida es un sistema de organización; implica organización; genera organización; punto-, a su vez, el concepto de información ha llegado para permear –y explicar- transversalmente a toda la biología. Simple y llanamente, un sistema de complejidad creciente es un fenómeno con creciente información y creciente capacidad de procesamiento de la información.

De manera más profunda y precisa, la información permite entender una de las preguntas últimas de la humanidad. El origen de la vida fue y es aún, normal y normalizadamente, visto como un asunto físico, químico y físico-químico. Este camino nunca ha producido buenos resultados. Lo mismo sucede con el problema relativo al origen del universo. Pues bien, de lejos, la teoría de la información –y más exactamente la teoría de la información cuántica-, arroja nuevas, muy refrescantes y significativas luces.

Contra intuitivamente, la información procede de la nada, pero esta no es, en absoluto, nada semejante a la nada pagana, cristiana y de algunos filósofos. Es perfectamente posible crear (cosas) a partir de la nada (Cassé, 2001). Sólo que la nada cuántica es el "mar" de partículas y ondas; ondas que se transforman en partículas, y al revés. No en vano se ha hablado incluso de ondículas. La información es física – siempre habrá que recabar en esta idea. Hay y es posible, una física de fenómenos no tangenciales o materiales. En otras palabras, la física actual ya no dice qué son las cosas, sino, mucho mejor, se ocupa de lo que sabemos y podemos decir de las cosas. Y esto apunta directa e inmediatamente a la información. La información es masa y energía e información. Estamos en una magnífica revolución científica. En consecuencia, recordando la ecuación mencionada antes arriba, el universo está constituido a partir de información – no ya simplemente con base en materia y/o energía.

Es posible afirmar lo anterior en otras palabras: la materia es información comprimida. Y acaso, asimismo, la energía es información o bien comprimida o en proceso. El universo es un evento, y la vida también es también un evento. Es decir, son singulares, y altamente improbables. Pues bien, cuanto más improbable es un evento tanta mayor información contiene. Así, las ciencias de la complejidad puede decirse que con ciencias de la sorpresa. La buena ciencia se aleja de lo redundante, trivial y conocido. Inversamente, cuanto mayor probabilidad tenga un acontecimiento menor información posee o implica. Sin ambages, el origen del universo como el origen mismo de la vida es información. La buena información no es comprensible. Por el contrario, la incompresibilidad –un tema que remita a Turing de un lado, y a Gödel, de otra parte-, constituye la marca de información relevante.

Es fantástico. Así las cosas, todo parece indicar que no es la segunda ley de la termodinámica la que resulta cardinal o desafiante. Mucho mejor, es la primera ley.

En otros términos, es la capacidad o incapacidad para transformar (= metabolización, homeostasis, procesamiento) un tipo de información en otro lo que define la marca de calidad del universo, de la evolución, e fin, de la vida. Cuando estamos en incapacidad para entender o bien para transformar una forma de energía en otra sobreviene el desorden; y entonces claro, la muerte, ocasionalmente (Vedral, 2010).

La conclusión es evidente. Si queremos sobrevivir, debemos cambiar; cambiar constante, incesantemente. El universo como la vida, la energía como la información son permanentemente cambiantes. En biología esto se denomina metabolización y homeostasis; en computación, e tema se llama procesamiento. En la vida y los sistema vivos, el tema que emerge es el de la creatividad. Contra Parménides, Zenón de Elea y Melisso de Samos, es Heráclito quien parece tener la razón. Dicho sin más, la complejidad es una teoría general de procesos, no de estados.

Nueva información modifica –o puede modificar- información previamente adquirida (en lógicas no-clásicas esto se denomina “lógicas no-monotónicas”-, y así, el conocimiento se mueve en dirección hacia lo desconocido; es, sencillamente, un proceso de indeterminación. De este modo, la conjunción entre la cuántica y la teoría de la información

quiebra en mil pedazos la concepción de un universo determinista – o en general, de la vida como un fenómeno determinista. Vivir significa indeterminarse incesantemente, y así, estar en proceso siempre abiertos hacia nuevos horizontes, cambios, previsibles o no, en fin, incesante aprendizaje y entonces adaptación. Sin ambages, todo esto implica, en gran escala, y específicamente en el contexto de un mundo diferente de suma cero, un giro civilizatorio.

Finalmente, digamos que el concepto de información y en general la teoría de la información en el sentido de los desarrollos que hemos mostrado, permiten una síntesis de diferentes ciencias y disciplinas. La realidad puede ser comprendida como un procesamiento de información. Más específicamente como un procesamiento de información cuántica o como un procesamiento cuántico de información – dos maneras diferentes pero equivalentes de comprender una misma dinámica.

En la base de la información hay aleatoriedad; mucha aleatoriedad. Es el mundo de los fenómenos y comportamientos cuánticos. En realidad, la aleatoriedad y la indeterminación no son opuestos. Los contextos son finitos y discretos. Y el procesamiento de la información es un fenómeno discreto, él mismo. La discreción, en este plano, puede decirse que radica en los signos en los que están escritos. Por definición, cada signo es limitado, finito o contable. Y sin embargo, se encuentra en una red de relaciones en los que unos signos un pueden leerse, en absoluto, ni interpretarse, al margen de los demás. El mundo, como la vida, demanda una mirada transversal y relacionante. Sólo que el procesamiento es incesantemente cambiante. Es esto lo que hace a la realidad tan colorida, tan lleno

de matices, en fin, polifónica. En una palabra: no existe, en absoluto algo así como “la” realidad. Existen o bien numerosos niveles de realidad, y lo determinante son los niveles, graos o escalas, o lo que es lo mismo, existen y son posibles numerosas realidades. Una dúplice idea que no tiene nada que ver con la realidad que se inaugura en la Grecia clásica.

| Capítulo 4

La cuarta revolución industrial: una historia en curso

Los ritmos de avance del conocimiento son hiperbólicamente acelerados. Hoy sabemos en numerosas áreas el 99% o el 100% de lo que jamás llegamos antes a saber de un fenómeno o sistema. En numerosos dominios, si se acumula todo lo que jamás se llegó a saber o conocer, difícilmente se llega al 1% o 2% de lo conocido y sabido. Hay numerosos motivos de optimismo. El mundo ha cambiado y está cambiando a ritmos vertiginosos.

Queda dicho: una revolución científica es una revolución en la cosmovisión del mundo y la realidad, y en la forma como nos relacionamos con ellos, o cómo los entendemos. A la vez, una revolución industrial es una forma como se organiza el trabajo. No existe una relación uno a uno entre un tipo y otro de revoluciones. La razón por la que le dedicamos un capítulo propio a la cuarta revolución industrial tiene que ver con el hecho de que es el futuro inmediato, y a corto plazo, previsible para todos nosotros.

La primera revolución industrial surge gracias a la máquina de Watt, en la segunda mitad del siglo XVIII. La segunda revolución industrial tiene lugar entre finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX. Es el triunfo de la producción en masa o en serie. La tercera revolución industrial surge gracias a Internet, a comienzos del siglo XXI. Pues bien, la cuarta revolución industrial es pronunciada en el 2016: su padre conceptual es K. Schwab, el presidente del Foro Mundial de Davos (*World Economic Forum*) (Schwab, 2017). La forma sintética de presentarla e introducirse en ella es que consiste en la síntesis entre la dimensión física, la biológica y la digital. Una forma, en verdad, sucinta y elegante de comprenderla.

Las expresiones más inmediatas y cotidianas de esta revolución son las impresoras en 3D, los carros que se pueden conducir a sí mismos, la inteligencia artificial, internet de las cosas,

las tecnologías 5G, la edición de genes –Crispr-, el desarrollo de la supercomputación, y muy específicamente el computador cuántico, todos los avances neurotecnológicos, entre otros.

Para entender mejor algunos de los elementos anteriores, hay que decir que los procesos de comunicación se han complejizado, y por tanto, integrado, crecientemente. Así, la primera generación de los procesos de comunicación permitió hacer llamadas; es el 1G. La segunda generación permitió añadir texto; es el 2G. La tercera generación de las capacidades tecnológicas de comunicación hizo posible enviar y recibir, además, imágenes; es el 3G. La cuarta generación consiste en el uso de internet móvil y video; es el 4G. La quinta generación, el 5G, permitirá conectar todas las anteriores, de tal suerte que se entrelazan entonces las cosas, los hogares, las industrias, la salud y las ciudades. Política y económicamente este es exactamente el centro del debate entre China y E.U. China, todos lo saben, ha tomado ampliamente la delantera en tecnologías 5G. Con todo, ya se está trabajando, en varias escalas en las tecnologías 6G. Estas serán las tecnologías que permitirán las conexiones entre el cerebro y los dispositivos tecnológicos – notablemente del tipo 6G. La revolución será de tal envergadura, se ha dicho, que las tecnologías %g parecerán como si fueran apenas del tipo 2G.

Sobre estos avances la pregunta no es: si sucederán, sino cuándo. Todo es, ya, cuestión de tiempo.

Una observación de tipo político se impone en este punto. Dicho en términos generales, la inmensa mayoría de científicos, académico, políticos y economistas son reacios a los desarrollos y las previsiones de avance de la inteligencia artificial. En este sentido, son ampliamente conservadores; ya sea con respecto al fenómeno mismo o con relación a los tiempos y ritmos. En contraste, hay una muy amplia minoría de científicos e investigadores que son partidarios y optimistas con respecto al hecho mismo y a sus consecuencias e implicaciones – de la inteligencia artificial. Estos, puede decirse, son mucho más progresistas. Quizás las dos voces más destacadas de esta minoría –progresista- son M. Tegmark (2018) y Russell (2019).

Es un hecho: los seres humanos han tenido una hija y deben aprender a vivir con ella. Esta hija tiene varios nombres –como a veces sucede también en la vida diaria-. Se llama inteligencia artificial, o vida artificial, o robótica, o tecnologías NBIC+S, o su nombre “de pila”: revolución industrial. El ritmo vertiginoso de los avances científicos y tecnológicos es totalmente disímil del ritmo, pausado y conservador de la cultura y la psiquis cotidiana. La gran mayoría de los seres humanos –incluyendo gobiernos, iglesias, industrias, academia y demás-, no han tenido el tiempo suficiente para adaptarse a los cambios en curso. Y sucede, naturalmente, la más básica de las reacciones en biología: todo organismo siempre rechaza de entrada cualquier cuerpo nuevo. Pues pudiera implicar amenazas y peligro. La cultura en general es eminentemente conservadora. Los cambios en la historia

sucedan a pesar de la cultura, y la mayoría de las veces contra ella. Semántica, lógica, metodológica y políticamente la primera función de la cultura es la conservar – creencias, formas de vida, estilos y estándares de vida; no transformarlos.

La síntesis entre la dimensión física, la biológica y la digital no es una metáfora. Es el resultado de las tres revoluciones científicas: la mecánica clásica (= física clásica), la teoría cuántica (= nueva física y definitivamente nueva biología), y la teoría de la información (cuántica) (= la dimensión digital). Como se aprecia, se trata de una combinación o articulación de diferentes tecnologías que están cambiando el mundo de manera radical.

Sin embargo, ya desde cuando fue anunciada, inmediatamente surgieron alertas acerca de las consecuencias que tendrá, que no son siempre positivas. Desempleo, desaparición de sectores económicos e industriales –como la logística y buena parte del sector bancario-, crisis de adaptación –como en el sector transporte-. Son numerosos los estudios al respecto. Algo análogo ha sucedido con cada revolución industrial. Ha habido, en cada momento, diversos sectores de la sociedad que han debido reinventarse. La educación ha sido entonces fundamental en estos procesos.

Una manera adicional de entender los procesos en curso es reconociendo las características de la web. En verdad, internet es sólo una manera de hablar –relativamente a la tercera y a la cuarta revoluciones industriales-. Internet es, por así decirlo, la radio o la televisión; sin intrascendentes. Lo verdaderamente importante es lo que sucede gracias a ellas; estas son las emisoras (y frecuencias) o los canales, respectivamente. Así, la web 1.0 es el internet básico, de la forma como la inmensa mayoría de las personas la entienden. Es decir, navegadores de texto bastante rápidos. Es unidireccional, se construyó de arriba hacia abajo, y tiene un carácter esencialmente divulgativo. La web 1.0 corresponde al surgimiento y auge del computador personal, ya sea en la forma de computador de escritorio o portátil. Puede decirse que cronológicamente corresponde a los años 1980s-1990s, que es justamente la etapa de socialización del computador, pero se proyecta también hasta el año 2000.

Por su parte, la web 2.0 es construida socialmente es más dinámica; aparecen las redes sociales de todo tipo, se comparten los recursos (por ejemplo, el drive, y en general las nubes de toda índole). En ésta, la información es compartida, y se puede acceder a ellas desde cualquier lugar. Esta es la web que, en la punta del mundo, corresponde a los años 2000-2010. Es el auge de las aplicaciones, YouTube, y las primeras redes sociales en todo su auge.

Ahora, la web 3.0 es construida de abajo hacia arriba, de forma colectiva, reinventado de forma permanente contextualmente. Se la conoce como la web semántica de las nubes y los mutidispositivos: celular, computador, etc. Esta es la web de la inteligencia artificial y los gráficos en 3D. (Ya hay revistas científicas que incluyen clips, videos y gráficos 3D

en los artículos que publican; no simplemente fotografías, cuadros y esquemas). Esta web puede decirse que cubre el lapso entre 2010 y 2020. Aparecen las bases de datos semánticas, y todas las redes sociales con sus altibajos. De manera significativa, la idea cumbre aquí es la de redes: de cooperación académica, gubernamental, industrial y otras.

La web 4.0 emplea la voz como comunicación –cuyo primer avance es Siri o Alexa, por ejemplo-. La voz permite activar y buscar contenidos y navegar. La integración se lleva a cabo en tiempo real, dado que las velocidades de búsqueda procesamiento son cada vez más vertiginosas. La ingeniería de hardware ha resultado muy importante en este plano. Esta es la web de los años 2020-2030. Se caracteriza, notablemente, por la búsqueda distribuida –y por tanto, cruzada- de información. Es la web del internet de todas las cosas (IoT, el acrónimo en inglés), y la interconectividad de todos los aparatos. Asistimos, así, al triunfo, consolidado de la domótica.

Ahora bien, desde ya se está hablando y se está trabajando en la web 5.0, que verosímelmente, corresponde a los años 2030-2040. Esta ha sido llamada la web emocional, y su fundamento es la inteligencia artificial; puntualmente dicho, se trata de la importancia de las cámaras en todos los dispositivos y en la vida social (por ejemplo, el “crédito social”, cuyo primer atisbo tuvo lugar en la China, pero que ya se aplica en numerosos otros países, aun cuando no haya reconocimiento oficial por parte de los gobiernos).

En esta web 5.0 los dispositivos pueden leer las emociones de los usuarios; por ejemplo, la arrugas, los gestos, la dilatación de las pupilas, la sudoración de la manos, el color de la piel, y otros aspectos fisiológicos, y descubrir así, con base en aprendizaje profundo (*deep learning*), los gustos, disgustos, preferencias y demás de los usuarios. Entonces podrán saber si, por ejemplo, los resultados de una búsqueda son satisfactorio o no, y demás. La base o el fundamento de esta web es una ingente cantidad de datos sobre cada usuario. Hay que recordar que la información es física, pero no pesa nada; se la puede acumular, compartir y demás. La gente no tiene en general la más mínima idea de la ingente cantidad de información que ella misma divulga –por ejemplo a través de las redes sociales-, y que esa información es acumulada y procesada incesantemente.

Es exactamente en este punto en donde cabe mencionar la importancia del hacker ético (cfr. <https://internetglosario.com/1131/Hackingetico.html>). Un tema sensible que atraviesa aspectos éticos, sociales y políticos. Los principales referentes de lo que significa esto es gente como Julián Assange, Edward Snowden y Chelsea Manning, para mencionar los casos más conocidos; y organizaciones como Wikileaks, Anonymus, y muchos otros grupos, todos, de un perfil totalmente bajo (cfr. Maldonado, 2019b).

La web 5.0 comprende igualmente los mp3 y mp4 –tan útiles en podcasts, de radio y video-. No en última instancia, se habla del tránsito de la web de las palabras y las cosas,

a la web de los pensamientos, las creencias y las sensaciones. El estudio del cerebro es determinante en este plano, y todo lo que él comporta (creencias, miedos, fantasmas, gustos y recelos, por ejemplo). Esto es lo que ha llegado a consolidarse alrededor de la Iniciativa Brain, de un lado o el Proyecto Brain, de otra parte, según si se mira a Europa o a E.U. Algunos de los desarrollos de punta considerados en este plano incluyen implantes subcutáneos y otros para el seguimiento de personas, compartimiento de información y otros aspectos relacionados. La lectura de frecuencias no habituales a la vista humana, el empleo de ropas o trajes que invisibilizan a los seres humanos a través de la disipación del calor de los cuerpos), y otros más forman parte de este espectro.

Este es el marco específico de la cuarta revolución industrial.

Las distribuciones de fechas de las diferentes web son en realidad esquemas clasificatorios; pues la verdad es que los ritmos son acelerados, y nada impide en principio que estas fechas puedan precipitarse en el tiempo. Son numerosos los intereses de trabajo en este sentido: al mismo tiempo académicos, científicos, económicos, financieros, de seguridad, industriales y de ritmos y procesos sociales.

Capítulo 5

La revolución de las ciencias de frontera o de síntesis

Hay que decir que en el curso del panorama que hemos establecido aparece un grupo de nuevo de ciencias que se diferencian enormemente de la ciencia clásica o moderna, que son paralelas a la segunda y a la tercera revolución científica, pero que aparecen también como paralelas o independientes a éstas. Se trata del surgimiento de un grupo de ciencias de frontera, fundadas justamente a partir de problemas de frontera.

Cronológicamente, se trata de las siguientes. Al mismo tiempo que quedan presentadas se incluye una caracterización puntual de cada una de ellas. Sin embargo, a fin de comprenderlas en conjunto se impone una precisión.

Cuando nace la ciencia moderna, lo primero que hace es organizarse en términos de lo que mejor conocía hasta el momento; es decir, sin ambages, una estructura feudal, o medieval. En verdad, la ciencia moderna se organiza con el surgimiento de las primeras academias: la *Royal Academy of Sciences* –o la *Royal Society*-, *l'Académie Française des Sciences*, la *Preussische Akademie der Wissenschaften*, y varias otras –en Madrid, Venecia y Rusia, entre otros lugares).

La historia de estas academias tiene, en cada caso, aspectos que valdrían un capítulo, por lo menos, por sí mismas. La forma primaria como son conocidas es como los “colegios invisibles”, determinantes en la forma como se piensa y se organiza la ciencia en la modernidad. Existen versiones desde su génesis en la masonería, hasta ideas de tipo conspirativo y revolucionario (Lomas, 2002). En cualquier caso, es una historia intelectualmente apasionante cuyas aristas se prolongan en formas de investigación, digamos, no oficiales, hasta la fecha (por ejemplo, en la investigación sobre Ovnis,

fenómenos paranormales, y muchos otros). Los colegios invisibles no han dejado de aparecer, siempre de forma velada o encubierta, con cualesquiera justificaciones.

Como quiera que sea, la ciencia moderna se organiza en términos compartimentados; en secciones de física, química, medicina, astronomía, matemáticas y otros. Incluso, en numerosos países se organizan academias perfectamente disciplinares, tales como la Academia Nacional de Medicina, la de Ciencias Económicas, y otras. Todo un verdadero contrasentido, tanto más después de ese momento singular que fue el Renacimiento, y que significó el rechazo o alejamiento de la especialización, compartimentación o división del conocimiento.

Vale anotar, de pasada, que la primera vez que aparece la palabra “científico” –acuñada por W. Whewell (1794-1866)-, significó “aquel que está interpretado en todos los campos del saber” y no en uno sólo. Un científico, en verdad, no es alguien que se interesa por una ciencia o disciplina, se forma y trabaja en ella. Que es en lo que devino la ciencia y el científico (Watson, 2017). En verdad, la ciencia moderna es la continuación, por otros medios, de la visión medieval, dividida, jerarquizada, centralizada y, más atrás aún, de esa estructura mental que funda Aristóteles con base en el análisis. Todo ello constituye, nuclearmente, el cuerpo más firme de la civilización occidental.

Pues bien, dicha estructura mental empieza a romperse con la primera revolución científica, se termina de quebrar con la segunda revolución científica, y termina por estallar en mil pedazos, por así, decirlo, si cabe la expresión, con el siguiente grupo de ciencias. Con lo cual emerge inmediatamente un contraste: en toda la historia de la humanidad estuvimos acostumbrados –incluyendo aún la ciencia normal- a hablar en singular, así: “la” ética, “la” ciencia, “la” filosofía, “la” matemática”, “el arte”, y demás. En contraste, la complejidad aparece en el momento en que se hace el reconocimiento explícito de que hoy hablamos de “matemáticas” (en plural), “las” ciencias, y así sucesivamente. La consecuencia radical de una expresión y comprensión semejante no escapa a un entendimiento sensible.

Pues bien, dicho lo anterior, cabe presentar los nuevos grupos de ciencias; estas son:

- *Ciencias cognitivas*

El primer grupo de ciencias con las ciencias cognitivas, que aparecen originariamente en el MediaLab del MIT en los años 1960s. El tema de este grupo de ciencias es un problema, a saber: establecer qué es el conocimiento. A fin de aclarar este problema, confluyen diferentes ciencias y disciplinas: la psicología, las ciencias de la computación, la biología, la filosofía, la lingüística, y varias más. El conocimiento (*knowledge*) se convierte en un problema; es claro que deja de ser una prerrogativa o un problema distintiva o específicamente humano. También los sistemas artificiales conocen, aprenden y tienen

memoria; y lo mismo puede decirse, sin ambages, de los animales y, más adelante, de las plantas. Precisamente por ello se acuña un neologismo: *cognition*, para designa que ya no se tiene un objeto o tema de trabajo (*knowledge*), sino un problema (*cognition*).

Así, desde la primera de las ciencias de frontera, aparece un rasgo que contribuye a comprender a todas las siguientes. Se trata de ciencias que, en contraste con la ciencia moderna, ya no tiene un objeto de trabajo y, derivativamente, un método (propio), un lenguaje (propio), una tradición (específica) y demás. Son, simple y llanamente, ciencias de frontera que se definen a partir de un problema de frontera. Un problema de frontera, así, se dice como un problema que o bien convoca a diferentes ciencias disciplinas y enfoques para ser resuelto, o bien, es un problema en el que confluyen tradiciones científicas y de investigaciones diferentes con el ánimo de entender el problema mismo que emerge y resolverlo entonces.

Consiguientemente, aparecen nuevos grupos de investigación, revistas dedicadas al tema, centros de investigación y nuevos canales: seminarios, circuitos de conferencias y otras actividades en el mismo sentido.

Algunos de los problema medulares, por extensión, de las ciencias cognitivas tienen que ver con la explicación sobre la naturaleza y el origen de la conciencia, el estudio de la mente, y las relaciones entre mente y cuerpo. De manera sorprendente, en contraste con toda la historia de la humanidad anterior, se llega al reconocimiento de que la conciencia no es un rasgo específico de los seres humanos y que, por el contrario, la conciencia existe, por decir lo menos, en los mamíferos superiores, los cordados y los mandibulados. Más radicalmente, es posible hablar legítimamente, y sin ambigüedades o metáforas, de autoconciencia con respecto a los mamíferos superiores, hasta la fecha. Quizás, en el futuro inmediato podrá ampliarse el rango del fenómeno de autoconciencia también a otras especies y clasificaciones de la vida.

Las ciencias cognitivas son uno de los ejes más dinámicos de la investigación de punta; constantemente nuevos descubrimientos y avances se logran de manera sólida.

- *Ciencias de la salud*

Las ciencias de la salud tienen una larga historia que se confunde con la historia de la medicina. Sin embargo, en su sentido fuerte, este grupo de ciencias emerge entre los años 1950s y 1970s. Uno de los centros principales de su constitución como tal es la Universidad Johns Hopkins, en E.U. La idea de base es el reconocimiento de que la salud humana no es un problema singular, que la salud como la enfermedad existen en otras dimensiones del mundo y de la naturaleza, y que por tanto, deja de tener una prerrogativa distintivamente disciplinar y antropocéntrica. Para cuidar la salud y resolver

las enfermedades se requiere del conjunto de las ciencias y disciplinas derivadas y complementarias de la medicina, y de una concepción más amplia sobre el mismo. En una palabra, la salud deja de ser un objeto de trabajo y se torna en un problema.

Forman parte de las ciencias de la salud todas las especializaciones médicas, además de la medicina veterinaria, la enfermería, las terapias en general, así como las diferentes escalas que va adquiriendo la medicina así: medicina clínica –basada en el paciente individual-, la medicina familiar y comunitaria, la medicina social e incluso, más recientemente, las consideraciones ambientales o ecológicas acerca de la salud y la enfermedad. Dicho en otras palabras, la salud, como la enfermedad, con un fenómeno que sucede mucho antes del ser humano, que atraviesa a cada quien, y que termina mucho después de cada individuo o persona.

La medicina, así, debe entrar en diálogo con otros saberes, entre los cuales se incluyen, la farmacología, la química en todas sus expresiones y derivaciones, las ciencias sociales y humanas y la ecología. En esto proceso, la contribución de la investigación básica, experimental y aplicada resulta fundamental, así como los propios desarrollos, básicos y aplicados de las tecnologías, tales como la radiología, la imagenología, la física cuántica (rayos x, rayos láser, y otros). La historia de la medicina y también la filosofía de la medicina se robustecen y se transforman contribuyendo un panorama singular en toda la historia de la humanidad. Se trata del hecho de que las expectativas, tanto como las esperanzas de vida, han aumentado de una forma que jamás sucedió en la historia de la humanidad. La ciencia y la tecnología, aunadas a la cultura le han “arrebatao” a la naturaleza un tiempo que ella jamás creyó posibles. Al fin y al cabo los seres humanos forman parte de una especie –los mamíferos-, y de un género –los homínidos y primates-, con ciclos cortos de vida; un aproximado de 15-18 años. En la actualidad, en el mundo, las expectativas y esperanzas de vida rondan los 80 años. Un logro fenomenal.

- *Ciencias de la vida*

Las ciencias de la vida nacen también alrededor de los años 1980s gracias a la confluencia entre tradiciones científicas y disciplinares diferentes a partir del reconocimiento explícito de que lo que sabía que era la vida resulta un problema. El descubrimiento de los extremófilos, en un extremo, los desarrollos de la vida artificial –Ch. Langton, Ch. Adami, J. Conway y muchos otros-, en el otro extremo ponen de manifiesto que la vida no es un tema de la biología, en absoluto, sino que convoca a otras ciencias y disciplinas.

Forman parte de las ciencias de la vida, además de todas las ramas de la biología y la medicina, la astronomía la astrofísica y la astroquímica, la biolingüística y la bioinformática, la ecología, la biología cuántica, la semiótica y la epigenética, y campos recientes como la biosemiótica. Como se aprecia sin dificultad existen numerosos puentes o cruces entre

las ciencias de la vida, las ciencia de la salud y las ciencias del espacio (que veremos a continuación). De una forma fundamental, las ciencias de frontera saben de inter, trans y multidisciplinariedad y marcan una ruptura fuerte y definitiva con respecto a la tradición de habla de ciencia; cada ciencia; una ciencia en cada caso, y demás. Desde todos los puntos de vista vivimos una época de mucha luz, mucho conocimiento, muchas posibilidades. Como nunca antes en la historia.

No es necesario que la vida tenga las formas que conocemos, y las estructuras y condiciones que hay en el planeta Tierra. Puede ser perfectamente posible otras formas, estructuras y expresiones de la vida. Si esta idea tiene sentido, entonces la ventana de observación, por así decirlo se amplía magníficamente. La idea que emerge es hermosa por elemental. Se trata de comprender a la vida-tal—y-como-es, tanto como a la vida tal-y-como-podría-ser-posible.

Este rasgo, que es particularmente claro en el caso de las ciencias de la complejidad significa que, en marcado contraste con toda la historia anterior, de la ciencia y de la filosofía, la buena ciencia de punta hoy no atiende única y principalmente a lo real —en cualquier acepción de la palabra, Mucho mejor, la buena ciencia de punta —y esto abarca entonces también a la filosofía- estudia ante todo lo posible, dentro de lo cual se inscribe, como un momento lo real. La ciencia de punta, sin más, es ciencia de posibilidades; y entonces y sólo sobre esta base, de realidades.

- *Ciencias de la Tierra*

Las ciencias de la Tierra por objeto el estudio de la historia de la Tierra, que comprende un período de cerca de 4 billones de años, pero no desconoce, en absoluto, la historia anterior. De consuno, las ciencias de la Tierra sirven de fundamento para otros programas de investigación de punta actuales, tales como la búsqueda de exoplanetas⁴, la exobiología, el programa de SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*) y la terraformación.

Fue el reconocimiento, en los años 1970s, de la hipótesis de la deriva continental, formulada por Wegener originalmente en la década de 1920s, la que sentó todas las bases para el nacimiento de las Ciencias de la Tierra.

Como es sabido, el sol tiene una vida de 5000 millones de años. Cuando nace el sol se forma, simultáneamente el sistema solar. Todos los sistemas solares se forman de afuera hacia adentro. De este modo, la conformación del sistema solar permite identificar el

⁴ El premio Nobel de física de 2019 fue otorgado, a dos investigadores por sus logros, a partir de 1992, en la metodología que ha permitido encontrar, a la fecha, miles de exoplanetas en el universo visible. Semanalmente se descubren por lo menos 4 exoplanetas, desde 1992. Es un programa con muchos logros y pleno de optimismo. Un exoplaneta es aquel en el que verosíblemente puede haber vida: exobiología.

nacimiento de la tierra hace 4500 millones de años. Es decir, casi dos terceras partes después del nacimiento (= big-bang) del universo (de este universo). El siguiente momento importante tiene lugar alrededor de hace 3800 millones de años: el nacimiento de la vida, gracias al Gran Evento de Oxidación; esto es, la creación de la atmósfera terrestre. Pangea, el continente originario, se divide gradualmente dando lugar a la deriva continental. En ésta, la tectónica de placas resulta importante. Las aguas se articulan como aguas saladas –mares y océanos- y aguas dulces, con son subterráneas, y de ríos y lagos. Al cabo, nacen los primeros organismos vivos y conquistan la Tierra –aunque algunos de ellos, específicamente mamíferos se devuelven a los océanos; son las ballenas y los delfines-. La vida ha aparecido y desaparecido en cinco ocasiones. Se trata de las grandes extinciones en masa. La última vez sucedió hace 56 millones de años con el meteorito que cayó en el Golfo de Yucatán. Gracias a ese evento nacen los mamíferos –más pequeños-, termina la era de los saurios, que duró 250 millones de años, y con los mamíferos, nacen los primates. Al cabo, una rama de los primates termina triunfando: el *homo sapiens*, y el *homo sapiens sapiens*. Con el paso del tiempo, llegamos al día hoy.

Las ciencias de la tierra estudian las circunstancias de esta historia, en la que la climatología resulta fundamental, y con ella, la bioquímica y la historia de los diferentes ciclos biogeoquímicos –el ciclo del oxígeno, del carbono, del nitrógeno del fósforo, y demás-. No en última instancia, aquello que caracteriza a un planeta con vida –la biosfera-, son inestabilidades, cambios, turbulencias y fluctuaciones; en otras palabras, terremotos, tifones, huracanes, lluvias, volcanes y ríos y océanos. El movimiento incesante y el cambio son la mara de la vida. Un planeta así deja de llamarse Tierra, un concepto físico o fiscalista, y pasa a llamarse biosfera, o Gaia, o Pachamama, o Tonanzin, y así, de acuerdo con los pueblos y culturas originarios.

La conclusión es que las ciencias de la Tierra estudian la historia de cómo el planeta está vivo; no que hay vida e planea, a la manera de continente y contenido. Y entonces, sobre este reconocimiento, se lanzan a la búsqueda de planetas semejantes en la vastedad del universo. Así, las ciencias de la Tierra consisten, ulteriormente, en la búsqueda de planetas vivos. Con una salvedad: mirar lejos es mirar al pasado. Esto quiere decir que otras formas de vida y, por derivación, de inteligencia, debieron preceder el origen de la vida en nuestro planeta. Una conclusión sencillamente fascinante.

- *Ciencias del espacio*

Las ciencias del espacio suponen los primeros logros de la antigua Unión Soviética con Yuri Gagarin, Valentina Tereshkova y la perra Laika, y las primeras misiones de E.U., toda la serie Apolo. Sobre esta base, ya a partir de los años 1970s, y hasta la fecha se desarrollan y consolidan, con aristas al mismo tiempo internacionales –en las que colaboran los diferentes observatorios astronómicos alrededor de la Tierra, los telescopios

extraterrestres y las distintas misiones no tripuladas enviadas a estudiar el sistema solar y más allá –Viking I, Viking II, Voyager I, II y III-, las ciencias del espacio cuya finalidad es estudiar diversos temas; por ejemplo, la estructura y el origen del sistema solar; la galaxia y los tipos de galaxias; las zonas habitables donde puede haber vida; la formación de los elementos de la Tabla Periódica en las tres generaciones de estrellas habidas hasta ahora (el Sol forma parte de la tercera generación de estrellas del universo); la estructura de la materia, y los retos que significan la materia oscura y la energía oscura; la evolución del universo, y no en última instancia, el origen del universo y el destino posible del universo. De esta suerte, las ciencias del espacio sirven de basamento para la cosmología (científica), una ciencia perfectamente joven que nace en 1964.

Las ciencias del espacio se estudian desde la tierra, pero también desde el espacio, con magníficos telescopios y enormes microscopios –siendo el más importante el acelerador de hadrones del CERN-, robustos aparatos o sistemas matemáticos, y nueva física y química. Muy notablemente, este grupo de ciencias son hijas de la segunda y de la tercera revolución científica.

Las ciencias que componen o articulan a las ciencias del espacio son todas las ramas de la astronomía (astronomía observacional, astronomía teórica, astronomía estelar y varias otras), la geología planetaria –la cual da lugar también a la exogeología, que estudia la composición geológica de los planetas y estrellas estudiados-, pero también la astrobotánica y la astrobiología, la arqueoastronomía y la medicina espacial. Este panorama permite una observación general para este grupo de diferentes ciencias de frontera. Han nacido y continúan naciendo numerosas ciencias y disciplinas –tanto como sub-ciencias y sub-disciplinas- que antes fueron inimaginables en la historia de la humanidad. No solamente, por tanto, hay verdaderas revoluciones –científicas e industriales-, sino, además, asistimos a una verdadera explosión de nuevo cambios de investigación y estudio. Una situación semejante de ciencias sólo ha sucedido, con muy guardadas proporciones, primero en el Renacimiento (Quattrocento), y luego también en el curso del siglo XIX cuando, particularmente, comienzan a nacer las ciencias sociales.

Desde cualquier punto de vista, una eclosión semejante de ciencias y disciplinas es una señal evidente de mucha vitalidad en el conocimiento; pues bien, sin la menor duda, la vitalidad en el conocimiento es expresión de vida, en cualquier acepción y sentido. Esta es una idea, mucho más que de optimismo (que lo es)-, de afirmación de la vida. Al fin y al cabo, la vida es conocimiento, o también, conocer es vivir, una idea bien conocida gracias a investigadores tan diferentes entre sí como Maturana y Varela, Solé, Goodwin, Kauffman, y varios más.

Las ciencias del espacio son muy jóvenes, pero sus logros no encuentran ningún parangón en el panorama de la ciencia en general. A la vez, su futuro es promisorio, a pesar de crisis económicas, recortes financieros y otras dificultades en el mundo. De manera mucho más

significativa, este grupo de ciencias permite claramente poner sobre la mesa, a plena luz del día el siguiente hecho: hoy, y por primera vez en toda la historia de Occidente, se está haciendo ciencia intergeneracional y, mejor aún, transgeneracional. Existe presupuestos y programas de investigación de cara a generaciones que no han nacido aún. Se trata de ciencia que se proyecta a 60, 80 y hasta 120 años; es decir, para científicos e investigadores que no han nacido todavía. Sólo grandes proyectos "científicos" antiguos pueden ser comparados en este plano; por ejemplo, la construcción de las pirámides en Egipto, la construcción del Calendario Maya, las observaciones astronómicas de los sumerios.

Una de las misiones más sensibles de este grupo de ciencias es el estudio y previsión de la probabilidad de que algún cuerpo solar –meteorito, por ejemplo-, pueda impactar a la Tierra; un fenómeno que sucede con frecuencia, pero, afortunadamente con meteoritos de poco volumen. Buena parte de la supervivencia de los seres humanos depende de esta capacidad, y de las acciones subsiguientes. Sólo, muy recientemente, se han comenzado a tomar acciones anticipativas al respecto. Al fin y al cabo, desde el sistema solar –en especial con el cinturón de Kuiper-, pero también desde fuera del sistema solar existe un sinnúmero de cuerpos cuya dinámica es esencialmente aleatoria.

- *Ciencias de materiales*

Uno de los campos más importantes, y si embargo desconocido para no especialistas son las ciencias de materiales, que es la hibridación entre la propia ciencia de materiales y la ingeniería; de forma creciente, hablamos de la ingeniería en el marco de la segunda y la tercera revolución industrial.

Puede situarse el nacimiento de este grupo de ciencia en los años 1960s cuando los E.U. crean la agencia *Advanced Research Projects Agency* –en un contexto en el que se crean diferentes agencias nacionales con distintos fines; por ejemplo, la NASA, los Institutos Nacionales de Salud, la CIA, y otras-. De entrada, los materiales se clasifican en tres grupos principales: cerámicas, metales y polímeros. Asistimos al nacimiento de dominios novedosos como la biotecnología, la nanotecnologías, y los mejores esfuerzos se dedican al estudio sobre las propiedades de los diferentes materiales. La conjunción entre física, química e ingeniería se torna determinante. Se trata de investigación básica pero con evidentes intereses experimentales y aplicados. Por vía de síntesis, como es sabido por el estudio de la Tabla de Elementos, los seres humanos han creado elementos artificiales (= materiales) que no existen en el universo. Es, notablemente, el caso del Prometo, el Tectenio, el Francio y el Astateno. Un logro sorprendente, sin duda.

Son cuatro los ejes de trabajo en las ciencias de materiales; esto son:

- a) la estructura; esta se concentra en el estudio de los materiales desde la escala

microscópica hasta la macroscópica. La espectroscopía y los análisis químicos son guías importantes al respecto. Los niveles de la estructura son: el atómico, los enlaces, el cristalográfico, la estructura nanoescalar, la micro y la macroestructura. Por su parte,

- b) el procesamiento. Este eje hace referencia a la creación de materiales con una estructura importante en las escalas nano (10^{-9} cm) y micro (10^{-6} cm). La historia de los procesamientos y descubrimientos o producción de materiales encuentra en el grafeno –un alótropo del carbón–, el mejor de todos los materiales en cuanto a dureza, flexibilidad y procesamiento. Un capítulo aparte merecería también el fulereno. El tercer eje,
- c) es la performatividad de los materiales, lo cual hace referencia, especialmente, a la termodinámica de los mismos. Esto es, la capacidad de los materiales y elementos de resistir o no calor, de acumular o procesar energía y en general, de poder realizar un trabajo con ellos. Finalmente, el cuarto eje:
- d) son las propiedades de los materiales. Esto es, su estudio según si son cerámicas, polímeros, semiconductores, biomateriales, nanomateriales o magnéticos, principalmente.

En cualquier caso, se trata del estudio de los materiales que componen naturalmente al mundo y la naturaleza, o que sintéticamente pueden ser empleados con fines científicos, militares, industriales otros (sanitarios, por ejemplo). Una de las aristas más importantes tiene que ver con uno de los capítulos más técnicos de la física, a saber: la física de la materia condensada. No en última instancia, se trata, asimismo, de ámbitos especializados como la ingeniería forense, o el análisis de fallas, importantes en numerosos campos de la vida diaria. Al cabo, todo ello redundará en el estudio de las condiciones que hacen a la vida humana más segura, con mejores calidades de vida y mayor dignidad. Se trata de evitar al máximo el número de accidentes, y la mayor seguridad en todos los ámbitos de la vida.

Naturalmente, como en los otros grupos de ciencia de frontera, el desarrollo ha sido tan sólido que existe revistas especializadas en el tema, y son varios los niveles de especialización en la investigación a partir de doctorados concentrados puntualmente en varios de estos capítulos, tales como química supramolecular, física del estado sólido, ciencia de superficies, o la ingeniería de polímeros.

- *Ciencias de la complejidad*

Como tales, las ciencias de la complejidad nacen en 1984 con la creación del Instituto Santa Fe, en Nuevo México (E.U.). Fueron originariamente concebidas como el estudio de

fenómenos caracterizados por emergencias, no-linealidad, adaptación y autoorganización, entre otros rasgos. Como se precia inmediatamente, no aparece una definición de complejidad; por el contrario, la complejidad de un sistema es comprendida a partir de las propiedades o características del sistema. Dicho negativamente, las ciencias de la complejidad se comprenden porque son no deterministas, no reduccionistas y no mecanicistas. En pocas palabras, este grupo de ciencias se define como negación y en oposición frontal a la primera revolución científica.

Aunque nunca habido una explicitación puntual de cuáles son estas ciencias, Maldonado (xyz) ha sugerido que, en su fase originaria, las ciencias de la complejidad son: el caos, la termodinámica del no-equilibrio, la teoría de catástrofes, la geometría de fractales, la vida artificial –hoy más genéricamente conocida como inteligencia artificial-, y la ciencia de redes complejas. Esta comprensión ha sido ampliamente acogida. Posteriormente, Maldonado ha sugerido que las lógicas no-clásicas forman parte también de las ciencias de la complejidad (Maldonado 2018 y 2020).

Sin embargo, teniendo en cuenta los desarrollos en curso, vertiginosos, robustos y originales de la ciencia en general recientemente, cabe legítimamente sostener que la epigenética puede también ser considerada como una de las ciencias de la complejidad. Una argumento a favor se encuentra en (Maldonado, 2020).

Ahora bien, ¿qué caracteriza en general a las ciencias de la complejidad? Desde el punto de la historia de la ciencia, la filosofía de la ciencia y los aspectos culturales, son varios los rasgos definitorios. Sin ser exhaustivos, estos son:

- i) La complejidad consiste en superar los dualismos de toda índole. Una visión binaria, dualista o bivalente ha sido la predominantemente ampliamente en la historia de la humanidad occidental;
- ii) Las ciencias de la complejidad son, manifiestamente no deterministas, no reduccionistas y no mecanicistas. Exactamente en este sentido:
- iii) Las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida, aun cuando lo contrario no pueda afirmarse necesariamente; esto es, que las ciencias de la vida son ciencias de la complejidad;
- iv) Las ciencias de la complejidad son biocéntricas (con todo y el equívoco que el sufijo puede desempeñar en esta última expresión). Esto quiere decir que el modelo clásico distintivamente antropocéntrico, antropológico y antropomórfico del mundo y de la realidad queda considerada simplemente como un momento particular de una concepción más amplia: el interés por la vida, en su forma actual o posible.

- v) De manera muy significativa, y en correspondencia con la segunda y la tercera evolución científica, se trata de comprensiones y explicaciones crecientemente contraintuitivas. El peso de la imaginación, de experimentos mentales, de pompas de intuición es fundamental.
- vi) Las ciencias de la complejidad no son ciencias de lo real en cualquier acepción de la palabra. Mucho mejor, lo real forma parte de lo posible. De esta suerte, las ciencias de la complejidad son ciencias de lo posible. Incluso, más ampliamente, puede decirse también que se ocupan de lo posible y de lo imposible; la cohomología sirve aquí como entrada al estudio de formas, estructuras y comportamientos imposibles.
- vii) Las herramientas y técnicas de las ciencias de la complejidad son sofisticadas. Cabe destacar, muy especialmente, al modelamiento y la simulación. Más recientemente, las ciencias de la complejidad incorporan también a la ciencia de grandes bases de datos (big-data science). Dicho en términos elementales, se trata del aprendizaje y trabajo con lenguajes de programación.
- viii) Las ciencias de la complejidad son, en el sentido originario de la palabra, "ciencia" y en cuanto tal, no son simplemente un discurso o una cosmovisión. La ciencia es una forma de acción en el mundo, y en este sentido, el sentido de este grupo de ciencias es eminentemente práxico. Esto, desde luego, no significa dejar entrar por la puerta de atrás al dualismo teoría-práctica. Por el contrario, se trata del reconocimiento explícito de que la ciencia en general –como la filosofía– tienen como finalidad última cambiar el mundo, la actitud natural en la que en cada momento vive los seres humanos, y proponer sugerir o apostar por horizontes siempre novedosos.

* * *

A partir de lo que precede, es posible afirmar que los grupos de ciencias de frontera constituyen convergencias de intereses, lenguajes, fortalezas, aprendizajes y métodos y metodologías. Esta convergencia abre, de par en par, las puertas para los encuentros entre lenguajes, métodos y metodologías, aproximaciones, formas de organización y formas de acción disímiles con el fin de alcanza mejores luces sobre el mundo, la naturaleza y la ida en general. Con ello, ulteriormente, se trata de abrir de par en par las puertas para el encuentro entre "las dos culturas" (C. P. Snow): las ciencias y las humanidades.

Simple y llanamente, nadie podrá tener una comprensión cabal de la realidad, el universo, el mundo y la vida son integrar al mismo tiempo las artes y las ciencias, las humanidades y las ingenierías, en fin, el concepto y la metáfora. Nadie piensa bien únicamente con conceptos y categorías; además, pensamos con tropos: metáforas, sinécdoques, metonimias, parábolas, analogías, y otras figuras literarias. Al cabo, debeos poder pensar

sin jerarquías de ciencias y sin jerarquías de conocimientos. La razón es básica: sostener, en cualquier época o lugar, y con cualesquiera argumentos, que hay ciencias o formas de conocimiento mejores que otros equivale exactamente a afirmar que hay seres humanos mejores que otros; notablemente, esos seres humanos que conocen y dominan esos conocimientos considerados como excelsos o superiores. Una idea semejante es ética, social y políticamente peligrosa pues esconden entonces formas, veladas o abiertas de violencia, pues entonces existen, concomitantemente, seres humanos de menor valía –a saber, aquellos que no poseen o dominan dichos conocimientos considerados como superiores-. Desde ningún punto de vista, ya más, y hacia adelante, cabe la aceptación de formas de conocimiento mejores o superiores a otros. Dicho retrospectivamente, ni la religión ni la teología, ni los saberes iniciáticos y esotéricos, ni las matemáticas o un aparato físico-matemático pueden ser ya considerados como superiores o mejores-relativamente a otros; en absoluto. La historia de las jerarquías fue siempre la historia de la exclusión y la violencia. Exactamente en este sentido, y de forma literal, nos encontramos en medio de un momento apasionante en la historia de la familia humana: en medio de una grandiosa revolución científica; mucho mejor, en medio de distintas revoluciones, científicas y tecnológicas. Como con acierto lo sostuvo Kuhn, toda revolución científica no es, al cabo, otra cosa, que una revolución política; política, social, cultural y espiritual. Una gran parte de las gentes aún ignoran este aspecto. Es clave ponerlo abiertamente sobre la mesa, a plena luz del día.



Segunda parte
Cómo se investiga en
complejidad

Capítulo 6

Cómo investigar en complejidad: un desafío

El concepto de “verdad” en la ciencia contemporánea coincide con el concepto y el proceso mismo de investigación. Esto significa que verdad es un proceso, no un estado, una búsqueda y no una adquisición. En otras palabras, “verdad” es un proceso asintótico de continua aproximación, provisorio en cada momento, pero jamás definitivo. Lo que hacen hoy los científicos, artistas y pensadores es investigar; por ejemplo, explorar, conjeturar, arriesgar, proponer, buscar, indagar y demás.

El proceso de investigación se va plasmando en productos. Esos son o pueden ser tangibles tanto como intangibles. La investigación es algo que no se ve; solo se ven sus efectos, y estos son los productos. Por ejemplo artículos, poemas, cuadros, capítulos de libro, libros, registros, patentes, sinfonías, esbozos, y demás, tanto como charlas, conferencias, seminario, ponencias y otras formas de presentación y socialización del conocimiento. Ahora bien, propiamente hablando, un producto de investigación sólo es tal si está escrito y publicado; en otras palabras, un producto de investigación que reposa en una gaveta, en una cajón o en una USB, por ejemplo, no es, en manera alguna, un producto de investigación; es un borrador o algo semejante.

Pues bien, el vector de la investigación, si cabe la expresión, es el de producir o alcanzar un conocimiento nuevo. Al fin y al cabo, la ciencia se mueve en dirección hacia lo desconocido, nunca hacia lo conocido. En este sentido, el proceso del conocimiento consiste en un acercamiento hacia lo indeterminado, no hacia determinaciones. En esto consiste la investigación de punta. Precisamente por ello, la ciencia –como la filosofía– se hacen en la forma de críticas, cuestionamientos, disidencias, desacuerdos y divergencias, y no en la forma de acuerdos, consensos o pactos. En pocas palabras, la ciencia en general es un fantástico proceso de construcción de democracia en el sentido de un

impulso a la libertad de argumentos y demostraciones, antes que al adoctrinamiento y la obediencia. También por esta razón, como se observó al comienzo de este trabajo, hacer ciencia es una forma de vida fundada en grados –crecientes- de libertad.

No existe una única comprensión o definición de ciencia; por tanto, tampoco de investigación. En este sentido, la metodología de la investigación científica es más un estudio acerca de estructuras mentales, antes que de técnicas, métodos y herramientas. Se trata, por ejemplo, con respecto a las revoluciones estudiadas en este libro, sobre cómo es pensar como Newton; por qué la ciencia moderna se llevó a cabo de la forma como tuvo lugar y no de otra manera, y otros temas semejantes. Asimismo, por ejemplo, cómo es pensar como Einstein o Schrödinger y los demás. Por qué se formularon las preguntas que tuvieron y por qué no otras, y demás. Y entonces, claro, aprender a pensar, y a hacer investigación.

De manera sincera, no existe un camino de investigación. Existen, en el mejor de los casos, estilos de trabajo. Y siempre, sobre todo, experiencias. En este sentido, lo que sigue a continuación no es, en manera alguna, algo así como un recetario, y manifiestamente no, una serie de algoritmos. Análogamente a como a nadar se aprende nadando, y a montar bicicleta se aprende montando en bicicleta, análogamente, cabe compartir experiencias –y reflexiones- sobre la investigación. De manera puntual observemos lo siguiente: la inmensa mayoría de profesores de metodología de la investigación no ha hecho investigación, y ciertamente no de manera destacada. Y a su vez, la gran mayoría de científicos e investigadores no trabajan en la enseñanza-aprendizaje de metodología de la investigación. Pero algunos sí han escrito maravillosos libros sobre sus procesos, que coinciden, casi siempre, con sus vidas. La bibliografía al respecto es amplia y variada y merecería un capítulo historiográfico aparte. Quede esto como una tarea para otro momento, suspendida por lo pronto.

Curiosamente, sobre todo en América Latina, siempre que, en cursos, seminarios, talleres y demás, que se habla de ciencia en general, y especialmente de ciencias de la complejidad emerge la pregunta o la preocupación por las herramientas de investigación en complejidad. Esta es una particularidad cultural latinoamericana, cabe decir; una preocupación semejante no aparece en otras partes del mundo. Puede decirse que un interés semejante es el resultado de la historia acontecida hasta el momento, desde el Descubrimiento y al Conquista hasta la fecha-, tanto como el afán por tener elementos indicativos –si no prescriptivos- de trabajo. Habrá que volver en algún momento sobre este aspecto.

6.1. Tres tipos de ciencia, desde el punto de vista lógico y metodológico

Lógica y metodológicamente cabe distinguir tres tipos de ciencia. Estas tres clases de ciencia corresponden, grosso modo –esto es, no al pie de la letra-, al espíritu de las revoluciones científicas consideradas. Estos tres tipos son:

- *La ciencia inductiva*

La ciencia moderna nace, literalmente, desde abajo. Se funda en la observación del mundo y los fenómenos, en su descripción, en la formulación de preguntas, problemas hipótesis, y se aboca a la búsqueda de explicaciones sólidas y rigurosas. La guía de la ciencia moderna es la experimentación, por tanto. Emerge así, la idea del *método científico* – como un asunto singular, puntual: en singular: “el” método científico. La voz de Descartes resuena fon fuerza, como Corifeo. La consecuencia es apasionante: la verdad es y debe ser un asunto verificable y común para todos. Cualquier idea de “revelación” –por definición singular personal-, queda por fuera del ámbito de la ciencia (Ruiz y Ayala, 1998).

Hume fue quien primero formuló (1711-1776) el problema de la inducción; este consiste en establecer cuantos casos particulares son necesarios para establecer una generalización. Como se observa, se trata de evitar el peligro de generalizaciones rápidas y vagas, y sólo aceptar aquellas que tengan un criterio riguroso. En ese momento, la ciencia moderna estaba boyante con trabajos con investigadores prestigiosos como Newton, Darwin, Hooke, Vesalius, Leeuwenhoek, Crooke, Boule, Harvey, Lyell, y muchos otros. Ya se han creado las diferentes Academias de ciencias en distintos países y otras están en proceso de creación. La modernidad está en auge. Inglaterra se ha convertido en una nación de avanzada en el mundo, y pronto Francia verá el triunfo de la Revolución Francesa. Escocia es el gran reservorio científico del mundo. Es en este contexto que se plantea y discute la inducción; que será todo el basamento de la ciencia clásica.

Este constituye el método científico, por antonomasia. Y hay que decir que “el” método científico se desarrolla con base en el prototipo de ciencia que se está desplegando, cuyo epítome es la física. En pocas palabras. El método científico será físico o a la manera de la física. De esta suerte, todas las ciencias habrán de desarrollar una lógica y una metodología acorde al método de la física. Será a comienzos del siglo XX, especialmente con el Círculo de Viena, que la discusión sobre el llamado método científico habrá de sistematizarse. Emergen los problemas relativos a los criterios de demarcación –que

básicamente apuntan a la distinción entre la buena ciencia y la mala ciencia-, y los principios para determinar, consiguientemente cuál es una buena ciencia. Surge, así, el verificacionismo, la comprobación, la confirmación, la testabilidad y finalmente la falseación como criterios de científicidad. Sin embargo, en cualquier caso, todos ellos se basan, abierta o implícitamente, sobre el primado de la física. La obra de Popper ha sido identificada como la cumbre de este tipo de análisis. Se trata, dicho sin más, de la filosofía de la ciencia clásica, o lo que es equivalente, de la filosofía clásica de la ciencia.

- *La ciencia deductiva*

Esta puede ser llamada también de otras formas; por ejemplo ciencia axiomática, o hipotético-deductiva. Este tipo de ciencia tiene una historia más antigua que el método inductivo, y puede decirse, que o bien nace con Platón y Aristóteles, incluso aunque ellos jamás hayan hecho mención explícita del término, ni nada cercano, o bien, lo que es equivalente se sistematiza con la obra de Euclides y el nacimiento de la geometría y el método euclidiano.

En esto consiste ser griegos –a partir del período clásico y el helenístico-: en andar con una serie de postulados –técnicamente llamados “axiomas” o “definiciones”, y ver hasta el mundo se acoge o no a dichos pre-conceptos, pre-juicios, pre-comprensiones. Dicho técnicamente, ese es el objeto de los teoremas (en el caso de Euclides). La Edad Media, con todo y sus particularidades y diferencias con el mundo antiguo no modificará para nada esta estructura de pensamiento, y por tanto, de relacionamiento con el mundo. El epítome de este capítulo será en el contexto de la teología (*scientia magna*), la dogmática teológica; postulados que no se cuestionan para nada y se dan por sentados. Lo importante es lo que se sigue de los mismos. Este capítulo fue construido a través de los Concilios y los Sínodos, dio lugar a la Inquisición y actualmente a la Oficina de la Congregación para la Santa Fe, en el Vaticano. En la modernidad, un papel análogo se lleva a cabo en el positivismo jurídico, que es, sin duda, el núcleo duro en el nacimiento y consolidación del Estado moderno.

En otras palabras, la ciencia deductiva parte de definiciones y trabaja con definiciones. Tres ejemplos destacables de esta clase de ciencia son la matemática clásica –que es matemática de sistemas continuos-, la lógica formal clásica –llamada igualmente como lógica simbólica o lógica matemática, por ejemplo, y el derecho (positivo). Estos son sistemas científicos (una expresión general, en realidad) que pivotan ampliamente sobre la base de definiciones, axiomas o postulados. En la ecología de las ciencias y disciplinas, son tres notables excepciones.

- *Ciencia por modelamiento y simulación*

Esta clase de ciencia de funda en herramienta cultural: el uso del computador y el conocimiento de (elementos de) computación. Dicho de manera puntual, se trata del aprendizaje de, y el trabajo con, lenguajes de programación (*software*, en francés; *logiciels*, en francés). Digamos inmediatamente que el aprendizaje de lenguajes de programación es muy fácil y generalmente se plantea en cursos de horas (dependiendo del lenguaje, son cursos de 60, 90 o 120 horas). Como todo aprendizaje de un lenguaje o idioma, la clave está en la práctica.

Existen diversos lenguajes de programación. Hoy en día, el lenguaje base de programación de sistemas informacionales o computacionales es Java (análogamente a como en el pasado fueron Pascal o Cobol, entre otros), de tal suerte que si se conoce y maneja Java, se conoce, grosso modo, el 50% de la base de cualquier lenguaje de programación.

Para el estudio de la complejidad, el más idóneo de todos los lenguajes de programación es NetLogo, gracias al cual es posible trabajar Modelamiento Basado en Agentes. El beneficio de este lenguaje es su amplia biblioteca de modelos, la capacidad, si es necesario, de incorporar modelos estadísticos, las interfaces que permite establecer a su vez con otros lenguajes, y el hecho de que le enseña al estudiante (o aprendiente) a escribir código a la vez que desarrolla un problema de investigación y estudia sus dinámicas posibles.

Otro lenguaje perfectamente idóneo en complejidad es Gephi, que tiene las mismas bondades que NetLogo, pero sirve específicamente para trabajar redes complejas; por tanto, la estructura y dinámicas de redes, en desarrollo hacia *hubs* y *clusters*.

Quizás el mejor lenguaje científico de todos es Mathematica, por su robustez para estudiar numerosos temas y problemas. Sin embargo, se trata de un programa por el que hay que pagar licencia –los dos anteriores son gratuitos–, y que requiere, consecuentemente, un conocimiento anterior de matemáticas, estadística y lógica.

En estrecha conexión con lo anterior, existe también la ciencia de grandes bases de datos (*big-data science*). Hoy es cada vez más imposible trabajar ciencia de unta y hacer investigación de punta sin conocer la ciencia de grandes bases de datos. En este momento los dos mejores lenguajes para trabajar con grandes bases de datos son R y Python. Sin embargo, cabe advertir explícitamente que en general la ciencia de grandes bases de datos sólo es pertinente para quienes trabajen con grandes bases de datos. De lo contrario, resulta simplemente un lujo; es decir, algo no necesario.

Observemos, finalmente, que cabe distinguir el modelamiento de la simulación; no son equivalentes, y mucha gente los emplea como si estuvieran en un mismo nivel. Estrictamente hablando, un sistema lineal puede ser modelado; sólo un sistema complejo puede ser simulado.

6.2. El estudio y discusión de modelos

El concepto de modelo –teórico, científico; muy específicamente, un modelo matemático-, surge en 1896 con Poincaré, a raíz de su solución al reto formulado un tiempo antes por el rey Oscar II de Suecia. El resultado, con el que Poincaré logró ganar el premio fue el famoso problema de los tres cuerpos, que, por lo demás, sentó los cimientos para el posterior descubrimiento del caos. Un modelo es, simple y llanamente, una simplificación del mundo o de una parte del mundo; y al mismo tiempo, se trata de una interpretación de esa simplificación del mundo, de una parte del mundo. Semántica y metodológicamente, Poincaré cambió la historia de la ciencia. Es en este sentido que, derivativamente, cabe hablar, legítimamente de cosas como: un modelo pedagógico, un modelo teórico, un modelo jurídico, un modelo político y otras expresiones semejantes.

Una tipología de modelos científicos (Maldonado, 2017) pone de manifiesto que éstos se articulan de la siguiente manera: de entrada, cabe distinguir un modelo teórico o conceptual. Este se expresa en el marco teórico o conceptual de una investigación, y supone un manejo suficiente del estado del arte de aquello sobre lo cual se está investigando. Puede decirse que, por defecto, toda investigación ya posee un modelo semejante. Sin embargo, desiderativamente un buen investigador –independientemente del nivel de desarrollo o del área de trabajo en el que se encuentre- debe poder discutir o proponer un nuevo modelo.

Puede decirse, adicionalmente, que un modelo es matemático, o puede serlo. En este caso, es posible distinguir un modelo matemático según si se funda en matemáticas de sistemas continuos, o bien en matemáticas de sistemas discretos. La posibilidad de que una buena investigación posea, además, un modelo matemático depende, naturalmente, de las fortalezas matemáticas del investigador –o grupo de investigadores-. Esto quiere decir que no es estrictamente necesario que una investigación incorpore un modelo matemático.

Adicionalmente, gracias al hecho de que la lógica posee un estatuto epistemológico propio diferente de las matemáticas, es posible que una investigación se base, adicionalmente al modelo teórico o conceptual, en un modelo estadístico. Aquí también, todo dependerá de la conveniencia, la necesidad o también de las fortalezas del o los investigadores.

De otra parte, es posible que una investigación de punta se base, adicionalmente, en un modelo lógico. Como es sabido, la lógica es una disciplina propia independiente de la matemática en general, aunque siempre con fuertes nexos con ella. En el caso de que se incorpore un modelo lógico, cabe subrayar que éste puede ser de dos tipos, excluyentes; esto son, de un lado, un modelo basado en la lógica formal. Como es sabido, la lógica

formal clásica se denomina de varias maneras; así, por ejemplo, la lógica simbólica, la lógica matemática, la lógica de predicados o la lógica proposicional. De otra parte, se trata del panorama, bastante más amplio, rico y sugestivo de las lógicas no-clásicas (Maldonado, 2020). Un modelo lógico no es de menor valía o fortaleza que, por ejemplo, un modelo matemático. De manera atávica, habitualmente se conoce mejor a la lógica formal clásica; sin embargo, creciente, aunque aun incipientemente, es cada vez mayor el papel de alguna de las lógicas no-clásicas como soporte de un modelo científico.

La computación en general y por tanto los sistemas informacionales constituyen una herramienta cultural determinante en el desarrollo de la vida cotidiana, y definitivamente necesaria en el desarrollo de la buena ciencia; incluso, en muchos casos, de la buena filosofía. En este sentido, es preciso distinguir dos tipos adicionales de modelos.

Un modelo se dice que es informacional cuando se trabaja con software ya disponible o existente. Son numerosas las ayudas o lenguajes de programación en este caso; desde el más común, que es Excel, hasta los más sofisticados y recientes. Al mismo tiempo, de otro lado, cabe hablar de un modelo computacional. En este caso, se trata de un modelo basado en la capacidad para escribir código. Existen, con todo, diversos lenguajes de programación que permiten combinar –particularmente a partir de la robusta biblioteca que tienen, y de la interface que permite cruces con otros lenguajes de programación distintos. En el caso particular de las ciencias de la complejidad, se trata, por ejemplo de NetLogo –y puede entrar en comunicación, por ejemplo-, con Python-.

Dicho lo anterior, una buena investigación de punta, hoy en día, debe poder tener por lo menos dos tipos de modelos. Uno, el modelo teórico o conceptual, lo cual comporta claridad suficiente sobre el panorama intelectual del problema de trabajo, tanto como de las vecindades epistemológicas, afines o en disputa. Y de otro lado, por lo menos uno de los modelos adicionales mencionados: matemático –continuo o discreto-, estadístico, lógico –clásico o no-clásico-, e informacional o computacional. Este reconocimiento permite una observación puntual.

En América Latina, la inmensa mayoría de trabajos sobre complejidad son sencillamente epistemológicos. Importante, la epistemología, sin embargo, es insuficiente por parcial. Exhortativamente, sería deseable que, de forma creciente, los trabajos e investigaciones incorporaran, adicionalmente, por lo menos uno de los demás tipos de modelos. Ello redundaría en una solidez teórica mayor y una fortaleza y distancia con respecto a la ciencia clásica, la cual todavía pivota en torno a la vieja discusión sobre métodos cualitativos y métodos cuantitativos, y ocasionalmente, a lo sumo, sobre métodos mixtos o híbridos.

En otras palabras, es posible reconocer explícitamente que un buen investigador – en formación o ya formado- no hace única o principalmente investigaciones sobre autores; y no solamente entiende o explica fenómenos o dinámicas o comportamientos.

Adicionalmente, se trata de la discusión, a propósito del o los autores estudiados, y de los fenómenos bajo consideración, de discutir y formular modelos. Y con ellos, y más allá de ellos, ulteriormente, de proponer o discutir teorías.

6.3. Con modelos, hacia teorías y ciencias

El sentido de la investigación formativa consiste en la posibilidad de formar investigadores connotados; en un primer momento; y desiderativamente, a mediano o largo plazo, en formar pensadores (= filósofos) o científicos. Esta es, sin embargo, una apuesta a largo plazo, y de entrada nada garantiza que ello haya de ser así necesariamente. En esto consiste, exactamente, la distinción entre comunidad académica y comunidad científica. Necesarias ambas, complementarias, son, sin embargo, diferentes. Una pivota en torno a la apropiación social del conocimiento; un aspecto absolutamente necesario. La otra consiste en la apuesta por mover las fronteras del conocimiento. Cada una tiene sus dificultades y especificidades.

Cabe sugerir la siguiente propedéutica, a largo plazo: en un primero momento, un joven científico se da a la tarea de dominar muy bien las técnicas de la investigación, algo análogo a lo que sucede con el estudio de la música, por ejemplo. Así, por ejemplo, aprende a hacer búsquedas bibliográficas, a conocer y apropiarse de las técnicas, herramientas e instrumentos de investigación en cada caso, y va controlando de manera idónea el estado del arte. De consuno, aprende a discutir, evitando argumentos ad hominem, escribiendo textos de diferentes calibres, a compartir experiencias y puntos de vista, por ejemplo.

De manera significativa, en este proceso, el científico en formación aprende a identificar los principales modelos en el ámbito en el que trabaja, y todas sus características, fortalezas y debilidades. Gradualmente, debe poder, igualmente, apostar a formular modelos. En todo este proceso el joven investigador de ha formado en el nivel doctoral, que es el que forma científicos, propiamente, y acaso se ha lanzado en niveles de investigación más avanzados (= postdoctorados).

El tiempo pasa, el joven investigador crece, se consolida como tal, va haciendo distintas publicaciones y demás. Ya formado y acaso con algo más de madurez, un científico (= filósofo) debe poder, adicionalmente, formular o desarrollar teorías. Esto, naturalmente, tiene tan sólo un valor desiderativo; nada obliga a que así deba ser. En todo caso, un gran científico formula, concibe, desarrolla o estructura una teoría – sobre un campo científico o disciplinar particulares, o sobre un dominio dl mundo o de la realidad, para decirlo genéricamente. A lo largo de la historia, sólo un puñado de investigadores contribuye

activamente a la comprensión del mundo. Esos son los que logran alcanzar teorías. La teoría de la evolución, la teoría de la relatividad, la teoría de juegos, por ejemplo.

Sin embargo, este no es final. Ulteriormente, solo un puñado de científicos o investigadores logran, excepcionalmente, crear ciencias –ciencias o disciplinas-. Nace la sociología, nace la psicología, nace la antropología, nace a geometría de fractales, nace la termodinámica y del equilibrio, y así con muchos otros ejemplos.

El tema de base aquí es el siguiente: un profesor, académico o investigador cualquiera, ¿hace o ha hecho contribuciones al campo e el que se formó, o simplemente vive de dicho campo? Esta es una pregunta fuerte: la inmensa mayoría de investigadores simplemente vive de lo que una esfera del conocimiento ha producido; exhortativamente, debería ser posible, por lo menos como retribución, contribuir al campo en el cual cada quien se ha formado; en religión, en política, en educación, en filosofía, en matemáticas, en física o en el dominio que sea. Como se aprecia sin dificultad, el tema es de reciprocidad, no simplemente de deuda y aprovechamiento.

Esto es lo que hace a un espíritu grande: en ciencia o en filosofía, en arte o en espiritualidad y demás.

La propedéutica mencionada supone un camino de apuesta, desafíos, riesgos, libertad, mucha autonomía, mucho criterio propio, y bastante independencia y autodeterminación; que son, algunos de los rasos de una voluntad de vivir, una voluntad de vida. Nadie que crea verdaderamente en el arte y el pensamiento puede ser pesimista; al fin y al cabo, inventar, era, pensar, descubrir comportan, si cabe la expresión, pulsiones de vida, mucho más que pulsiones tanáticas. Dicho, naturalmente, en general. (Lo que vale aquí es el espíritu, más que la letra). Este camino establece claramente, por consiguiente, que, en sentido ascendente, la licenciatura, la maestría, el doctorado, y el postdoctorado no son el punto de llegada sino, en cada ocasión, que el punto de partida. La vida, como el conocimiento, no son jamás un punto de llegada: se trata, en cada caso, siempre, de puntos de partida. Nunca dejamos de nacer y empezar, jamás cesamos de aprender y re-inventarnos. Sí cabe aquí esa ética de Sartre: el más grande invento del ser humano es sí mismo. Esto es lo que constituye la historia del espíritu.

La gran enseñanza de la complejidad, en este punto estriba exactamente este punto, a saber: los sistemas complejos son abiertos. De lejos, ampliamente, el fenómeno o el sistema más complejo posible de todos es la vida. Adicionalmente, la vida es un fenómeno alta y crecientemente contraintuitivo. Pues bien, la *conditio sine qua non* para ver y estudiar sistemas complejos consiste en tener una estructura de mente abierta, lo cual se dice fácilmente pero es extremadamente difícil de llevar a cabo. Al fin y al cabo, como parte de la facticidad de la existencia, cada quien tiene ya un sexo, una lengua, un credo, una cultura, y demás.

En verdad, la investigación es una forma de vida: la ciencia, por lo demás, no se hace con consensos o mayorías; por el contrario, se hace basada en discusiones, disputas, argumentos y contra-argumentos, demostraciones y mucho debate. Exactamente en este sentido, dicho en general la ciencia tanto demanda condiciones de democracia para ser posible, como sienta las bases para una democracia fuerte, radical; esto es, por ejemplo, participativa, deliberativa, y nunca simplemente representativa. En otras palabras, la investigación es un proceso de juego, de riesgos; por consiguiente, de mucha libertad. La investigación implica dos cosas: *capacidad de apuesta y de riesgo*. La investigación es un proceso de ludopatía (Maldonado, 2018b).

Tener una estructura de mente abierta, significa alcanzar la capacidad tanto para, si llega ser preciso, lograr reconocer que se está equivocado, o también, en un plano distinto, tener la capacidad para re-inventarse (continuamente). En toda la línea de la palabra, se trata de desplegar una actitud de revalorización, de cuestionamientos, preguntas, de un sano escepticismo. Las doctrinas, en verdad, impiden entender las ciencias abiertas y los cambios en los fenómenos y en el mundo.

En cuanto forma de vida, la ciencia y la filosofía son una extraña mezcla de *hybris* –por la vida- y de sosiego –gracias a la idea misma de procesos y a que se define por tiempos largo, muy largos-. Manifiestamente, el conocimiento es uno de esos pocos bienes mediante los cuales damos y no quedamos con poco o menos; todo lo contrario. Si en el campo de la educación es ya suficientemente sabido que la mejor manera de aprender es enseñando, en la investigación, la mejor forma de recibir es dando, incluso a sabiendas que no se espera recibir nada. Una extraña forma de vida, en verdad. Jamás se recibe tanto como cuando se da, incluso con el reconocimiento explícito de que no se da para recibir. Eso es el conocimiento, como la vida misma; o en otro plano, el amor: *philía* por el *sophos*.

6.4. Algunas ideas en torno a la investigación

Hubo un tiempo en el que el saber se bastaba con la palabra hablada. Es en este sentido, se ha dicho, que cuando muere un chamán muere una biblioteca entera. Existen culturas y pueblos en los que la palabra hablada es suficiente. Occidente, por el contrario, descansa ampliamente en la palabra escrita. La escritura, parece ser, es la memoria –permanente- de la palabra hablada. El desarrollo del video, y en general, justamente, el tránsito desde la web 1.0 hasta la web 4.0, por lo menos, permiten la combinación de la palabra hablada con otras formas de permanencia o de memoria. La ciencia forma parte, cada vez más, de una cultura semejante.

La ciencia –como la filosofía- (y ellos pesar de esa tradición a la que perteneció Sócrates), se hace, si cabe la expresión, en blanco y negro. Es decir, la investigación se plasma, al cabo, en productos tangibles, o de lo contrario, no existe. Una idea, en verdad, fuerte.

De manera genérica, es posible distinguir dos tipos de productos de la investigación; estos son (el orden no importa):

- a) Productos intangibles. Un producto intangible es, como se sabe, un curso, una conferencia, un seminario, incluso una grabación o una entrevista. Estos productos intangibles pueden ser identificaos también como la producción de literatura gris; es decir, de producción limitada, de carácter divulgativo y sin mayor publicidad. La forma puntual como se conoce a esta literatura es como “documentos de investigación” (*working papers*). Esto es, se trata de avances de investigación aún provisionales y sin ningún carácter definitivo. Sin embargo, es también un producto intangible una ponencia presentada en un evento, académico o científico, y que no ha sido publicado o no llega por alguna razón a publicarse.
- b) Productos tangibles. Son productos tangibles artículos en revistas reconocidas –con ISSN, doi, identificación de ORCID, y correo electrónico y afiliación institucional-, los capítulos de libros y libros. En otro plano, son igualmente productos tangibles los registros y las patentes (en algunos campos del conocimiento como la ingeniería, las ciencias médicas y la física, y otros). Pues bien, sin menoscabar los productos intangibles, la investigación se mide, positivamente, por los productos tangibles Son exactamente estos los que permiten reconocer a un investigador, hasta el extremo de que, finalmente, se plasman en el índice h, que mide la calidad y el impacto de la producción intelectual de un investigador. Nadie que no posea un determinado índice h puede ser llamado un investigador; y los hay de distinto tipo, desde el de Scopus, al de Google Science Citations, el de Researchgate y otros más⁵. El tema que emerge aquí es la *cienciometría* – un campo novedoso que emerge por primera vez en 1963 con el manual de Frascati y que se ha venido desarrollando y depurado (con los Manuales de Canberra, Oslo y Bogotá, particularmente). La *cienciometría* se articula en ella misma, la *infometría*, la *bibliometría* e incluso la *epistometría* (Rescher, 2006).

El acento que crecientemente se pone en la *cienciometría* ha sido objeto de numerosas críticas, la mayoría de las veces injustificadas por externas. La expresión más puntual de las mismas es la elaboración de escalafones (*rankings*); y los hay de todo tipo –de universidades, de programas académicos, de profesores, por ejemplo-. En cualquier

⁵ Como es sabido, el índice h se elabora originariamente por el profesor Jorge Hirsch de la Universidad de California. Se trata de una ecuación que mide al mismo tiempo la calidad y el impacto de la producción intelectual. Son numerosos los críticos de la idea de que los académicos y científicos puedan medirse por este índice; por regla general, los críticos pertenecen a grupos de profesores y demás que no tienen un índice h, o que es muy bajo.

caso, es indispensable subrayar o siguiente: la *cienciometría* no establece *verdades*; tan sólo *indicadores*.

La *cienciometría* puede condensarse un problema básico: no es suficiente con hacer las cosas, ni tampoco con saber las cosas. Adicionalmente debemos poder cuenta de cómo hacemos lo que hacemos, y cómo sabemos lo que sabemos. Esto implica una cuantificación de la investigación. En contextos o tiempos aun fuertemente cualitativos, esta idea puede ser molesta e invasora.

En cualquier caso, hacer ciencia es como meterse a la piscina, si cabe la metáfora. Hay que exponerse, y la mejor y más clara forma de hacerlo es justamente escribiendo y publicando. Una vez que algo está publicado, se sale de las manos del autor, ya no le pertenece, literalmente, pasa a ser propiedad común, y entonces hay consecuencias. Una de ellas es el reconocimiento de que, quizás, se está contribuyendo a la comprensión del mundo y de las cosas. Y se hace así a la vida mejor.

Pues bien, una de las consecuencias es un ejercicio de moderación, de respeto hacia las gentes, y de aceptación de otros puntos de vista. Solo un déspota define la genialidad o la normalidad, o lo real, a partir de sí mismo. En ciencia en general, por el contrario, son los demás los que definen si un texto es claro, si un argumento es razonable, si un producto es bueno o no, por ejemplo.

En verdad, no es suficiente con indagar sobre un tema, con conocerlo o saberlo. Además y fundamentalmente, debe ser posible compartir lo sabido y aprendido. La expresión más pura de este acto de compartir es, ulteriormente, cuando se lo escribe y publica. Naturalmente, escribir tiene gamas, lenguajes, medios, calibres. Y siempre cabe, idealmente, combinar distintas formas de acción, de expresión, de divulgación y publicación. La escritura puede ser vista como la forma más acabada del dominio de un tema, y con ello, también del dominio de un idioma. Sin la menor duda, la verdadera riqueza de un idioma es escribir en él. Una vez que se publica, esa semilla ya no es de quien lo escribió. Y entonces el pensamiento, puede decirse, se vuelve en semilla. Un buen científico, filósofo o investigador no es otra cosa, al cabo, que un sembrador. Y como en la vieja metáfora, se siembra, y nunca se sabe cuál semilla germinará, cuál no, o en cuánto tiempo. Al cabo, existe diversas formas de cosechar lo sembrado. En verdad, la expresión d sembrar es de lejos mucho mejor que la de construir, pues en la siembra, como el campesino, hay que preparar la tierra, sembrar, cuidar el cultivo, y esperar. El proceso no depende de cada quien; es la naturaleza la que habla, y con ella, la vida misma.

Una de las condiciones más importante importantes para un buen científico es manejar un buen estado del arte. Esta es la única obligación de un buen investigador; n siquiera evitar el plagio, pues hoy en día existen distintos programa antiplagio que son usados por

colegas, editoriales, revistas y otras fuentes. Estar permanentemente al día en el estado del arte puede ser identificado, sin la menor duda como una obligación al mismo tiempo ética y epistemológica, y es verdaderamente ésta la que permite establecer si un investigador es de calidad, o si hay excelencia en un trabajo o en una obra. Hay, en verdad, muchos profesores que leyeron, pero que ya no leen. Ahora bien, la actualización, permanente, en el estado del arte es cada vez más fácil gracias a las bases de datos disponibles, en universidades, centros de investigaciones e incluso, dependiendo de los países, muchas veces públicas. Al fin y al cabo, la calidad de una biblioteca estriba exactamente en las bases de datos que maneja: bases de revista y demás, además de los indicadores claramente bibliométricos.

El estado del arte puede plasmarse no ya solamente en la bibliografía incluida al final de un artículo o de un libro. Mucho mejor, en un artículo, el estado del arte aparece ya en la primera sección o párrafo; y en una tesis –de maestría o de doctorado–, manifiestamente en el primer capítulo. En ellos, se debe poder identificar claramente cuáles son los autores, las universidades, las líneas de investigación, los centros e institutos que están trabajando o han trabajado en el tema que concierne al investigador. Al mismo tiempo, se debe poder mostrar los matices, las discusiones, los logros y las limitaciones en dicho estado del arte.

Es sobre la base de un sólido estado del arte que, entonces, y sin que sea una receta, el segundo capítulo de una tesis, o la segunda sección de un artículo entra ya a discutir el o los problemas de la investigación y a desarrollar la tesis que se quiere defender.

Hacer ciencia no es fácil. Hay muchas otras actividades que son inmensamente más fáciles de llevar o de hacer. La razón de la dificultad no estriba en aspectos como la importancia del bilingüismo, la existencia de bibliotecas y bases de datos de alta calidad, presupuestos para viajar y organizar eventos, política de calidad de publicación y muchas más. No sin éstas y otras, la razón por la que la ciencia es, de lejos bastante evidente y excepcional, es porque, por así decirlo, en ciencia no hay medalla de bronce ni de medalla de plata, no hay premio de participación y premio de consolación, por ejemplo. En ciencia solo hay medalla de oro. Esto quiere decir: no se puede pensar lo que ya se ha pensado, no se puede descubrir lo que ya se ha descubierto, no se puede inventar lo que ya ha sido inventado.

Si cabe una analogía con la vida cotidiana, en ciencia sucede todo lo contrario a esas reuniones de amigos, de vecinos o de colegas, por ejemplo, en los que después de que se ha hablado ya sobre un tema, alguna persona pide la palabra y vuelve a decir lo que ya se ha dicho, pero con otras palabras. Cosas semejantes son posibles en numerosas instancias de la vida y la sociedad; no en ciencia. Es decir, alguien fácilmente se descredita si dice lo que ya alguien ha dicho, aunque sea con sus palabras, y se desacredita si no contribuye activamente al conocimiento; notablemente, al proceso, difícil y riesgoso, de

correr las fronteras del conocimiento. La redundancia produce ruidos en el mundo de la ciencia, aunque no sea así en otros dominios de la vida social.

Si cabe decirlo de manera metafórica pero fuerte: hacer ciencia es un acto poético, y la buena poesía debe ser distinta – distinta y novedosa en cada caso, en cada momento. Un buen investigador solo puede aspirar a medalla de oro, porque no hay más. Con algo de ironía cabría decir: más vale ser profesores –y los hay muy buenos- antes que científicos; los riesgos y las apuestas son bastante menores en el vaso de la educación; en ciencia –o filosofía-, las apuestas y la capacidad de novedad y creatividad debe –exige- ser de alto rendimiento, en toda la acepción de la palabra.

Capítulo 7

Herramientas de complejidad

Dicho en una sola palabra y de manera muy condensada, la complejidad consiste en el estudio del movimiento. Ahora bien, el movimiento fue descubierto explícitamente, por primera vez, en la modernidad. La forma como se lo descubrió y explicó fue en términos de mecánica clásica; esto es, por ejemplo, de revoluciones celestes. Se trató de la idea de un movimiento cíclico, periódico, regular. Para explicar este movimiento se desarrolló el cálculo –es decir, ecuaciones integrales y ecuaciones diferencias, incluso ecuaciones diferenciales de segundo grado–.

Pues bien, no es éste el tipo de movimiento que interesa ni el que define a la complejidad. Antes bien, se trata, propiamente, de movimientos súbitos, imprevistos, incontrolables e irreversibles. Esta clase de movimientos se llama: caos, o catástrofes, o inflexiones, por ejemplo. Estrictamente hablando, las ciencias de la complejidad no estudian sistemas dinámicos sino que sistemas dinámicos *no lineales*. El concepto de “dinámica” y “sistemas dinámicos” es, por el contrario, justamente propio de la mecánica clásica y, con ella, de la mecánica estadística.

De suerte que, grosso modo y de un modo muy general, puede decirse que los problemas complejos son aquellos que implican movimientos, tiempos, cambios que son súbitos, imprevistos, irreversibles. Son exactamente éstos los que pueden ser llamados como cisnes negros. Pues bien, esto significa que no todos los problemas son complejos; que las ciencias de la complejidad no son ciencias de todas las cosas –un enunciado trivial, en verdad–, y que existe, consiguientemente una serie de herramientas propias de las ciencias de la complejidad que permite estudiar esos problemas que son estrictamente complejos.

Antes de presentarlos, se hace necesaria una observación. Se presentan a continuación una serie de herramientas propias de la complejidad, pero estas no pueden ser adoptadas

en sentido estrictamente instrumental. Las herramientas de la complejidad son una sola y misma cosa con la estructura mental y el aparato epistemológico de la complejidad. En otras palabras, no por conocer y dominar estas herramientas –o algunas de ellas, e es por ello complejólogo, o se trabaja en complejidad.

Presento a continuación las herramientas más distintivas de la complejidad. Sin embargo, mi ánimo no es aquí, en absoluto prescriptivo o normativo. Se señalan solamente los rasgos generales o distintivos. Cada una de ellas precisa de un espacio amplio de presentación y apropiación.

7.1. Medición de la entropía

Existen tres comprensiones diferentes acerca de la entropía. Cronológicamente, se trata de la entropía de Boltzmann, la entropía de Shannon, y la entropía de Zurek. La primera hace referencia al segundo principio de la termodinámica; la segunda, a la teoría clásica de la información; y la tercera tiene que ver con la información cuántica o con el procesamiento cuántico de la información.

La entropía es generalmente la medición del orden, o bien del desorden. La clave al respecto es que si se adopta que es la medida del desorden de un sistema, entonces no es posible afirmar lo contrario. La inmensa mayoría de comprensiones entienden la entropía como una medición cuantitativa de desorden. Sin embargo, esta es el resultado de los procesos de configuración de orden. Me explico.

La entropía es el resultado de la organización de un sistema, de tal suerte que a mayor organización (= complejidad) de un sistema, mayor es el desorden que genera el sistema en el entorno. En otras palabras, el costo de la organización –literalmente, el costo termodinámico– es la creación de desorden en el entorno del sistema considerado. De esta suerte, el orden de un fenómeno o sistemas es directamente proporcional al desorden que dicha organización genera en el entorno. Dicha medición es cuantitativa, se puede medir. La forma directa de medirla es considerando el costo de la organización del sistema y la forma indirecta, es atendiendo al entorno y estudiar entonces el desorden generado, haciendo abstracción del sistema en cuestión. Dos maneras diferentes pero equivalentes de considerar un mismo problema. Una manera genérica de hablar al respecto es diciendo que la entropía mide la incertidumbre – por ejemplo, de una fuente de información.

El tema de la entropía permite una recisión importante. La ciencia en general mide las cosas, el mundo, los fenómenos. Todas las cosas pueden y deben medirse. También en

complejidad sucede lo mismo. El matiz importante radica en que en la ciencia clásica –en la primera revolución científica, específicamente-, la medición producía un dato cuantitativo. Pues bien, no es necesario que una medición produzca necesariamente datos cuantitativos. Puede también producir acciones, decisiones, formas de organización, metáforas, y demás. Y claro, sí, también cantidades numéricas de diversa índole. El sentido, una vez más, de esta observación es que la epistemología es fundamental, pero insuficiente- En complejidad no existe en otras palabras, el debate entre la dimensión cualitativa (o conceptual) del mundo y la cuantitativa. Ambas son una sola y mi a cosa.

La comprensión de la entropía permite precisar un rasgo epistemológico singular de la complejidad, a saber: el punto más fuerte de un sistema es exactamente su punto más débil. Esta es una idea clave, por lo demás en física de materiales o también en ingeniería de materiales. Pues bien, lo que se hace en complejidad es estudiar un sistema y considerar entonces si dicho sistema se puede transformar o no. La entropía es una medición dinámica, y no ya simplemente un fotograma, por así decirlo. Los campos de aplicación o estudio son numerosos, desde la ecología y la biología de paisajes, hasta los sistemas educativos y económicos, entre otros.

Una ilustración rápida pero puntual de este tema puede ser la siguiente: cuando se es pobre se genera poco desorden en el entorno; los ricos, particularmente en el sistema de libre mercado y el imperio del consumo y el hiperconsumo, generan bastante mayor desorden en el entorno. Simple y llanamente, se trata del reconocimiento de que el sistema de libre mercado genera una producción abundante de productos, de bienes de servicio y demás. Aparece una enorme segmentación del mercado y se produce, por ejemplo, un champú para cada segmento de la población; hay champús para mujeres de pelo liso y crespo, tinturado y descolorido, para hombres, para perros y automóviles, para niños y para niñas, champú para el tapete y para la alfombra, etc. Los ejemplos y casos se pueden multiplicar a voluntad.

A título meramente histórico: las razones del fracaso del imperio romano estuvieron en el triunfo mismo del imperio romano, que se expandió y no pudo manejar su propio tamaño. Otros imperios han conocido un destino similar. En cada caso, sin embargo, se trata de medir un tipo de generación de entropía diferente.

Digamos, finalmente, que la medición de la entropía adopta aspectos muy técnicos ya cuando está referido a la teoría de la información cuántica y, por ejemplo, a temas de criptografía. Lo mismo cabe decir con respecto a fenómenos o procesos estocásticos.

7.2. Leyes de potencia

Una de las herramientas más importantes y sin embargo ampliamente desconocidas en complejidad son las leyes de potencia (*power law*, en inglés). Una ley de potencia es un tipo de distribución estadística, originariamente descubierta por Zipf, pero generalizada gracias a Mandelbrot, consiste en el reconocimiento de que, medidos en escalas logarítmicas, los fenómenos se organizan en el siguiente sentido: hay muchos fenómenos de muy poco impacto, unos cuantos, más raros de un impacto mayor, y muy pocos de un enorme impacto – en cualquier acepción de la palabra o contexto. Estas distribuciones han sido llamadas también de como de cola larga, y son ubicuas desde la distribución y crecimiento de los fractales a las de las ciudades, por ejemplo. P. Bak logró desarrollar una disciplina propia de las ciencias de la complejidad llamada criticalidad autoorganizada, y que pone en evidencia que la naturaleza misma se autoorganiza a partir de puntos y estados críticos que no pueden, de ninguna manera ser entendidos con base en la estadística normal –del tipo distribuciones normales (Gaussianas), de Poisson, de Bernoulli y otras próximas y semejantes-, sino con base en leyes de potencia (Bak, 1996). Una manera de hacer el contraste es señalando que las leyes de potencia trabajan o se concentran exactamente en los extremos de una campana de Gauss, es decir, en aquellos espacios y fenómenos que son desechados, con diversos argumentos por parte de la ciencia normal; específicamente por parte de la ley de grandes números. Es exactamente en los extremos de una curva de Bell –otra manera de entender los fenómenos de distribución normal-, en donde suceden las cosas más novedosas, preocupantes, apasionantes o inesperadas, según el caso. Pues bien, debe ser posible hacer ciencia de esa clase de fenómenos. La ciencia normal no puede hacerlo. Es entonces el patrimonio de la complejidad.

Las leyes de potencia son distribuciones, en otras palabras, que se fundan en una dúplice característica: existe siempre una potencia en la forma como las cosas se estructuran en el mundo de tal suerte que siempre se dará lugar. A partir de una medición determinada, a nuevos comportamientos, fenómenos y estructuras. En este sentido las leyes de potencia han sido observadas incluso en fenómenos astronómicos, tanto como también en movimientos sociales, religiosos y políticos. Esta potencia permite distinguir entre estados de subcriticalidad, estados de supracriticalidad, y los estados críticos; estos son autoorganizados.

De otra parte, al mismo tiempo, para decirlo en términos generales, no existe absolutamente ningún fenómeno que pueda ser sin más calificado de insignificante. La razón para ello estriba en el hecho de que son los fenómenos más excepcionales, los menos frecuentes, los que surgen y dan lugar a nuevas dinámicas. Así las cosas, las ciencias de la complejidad son exactamente ciencias de lo posible, mucho más que de lo real, como queda señalado antes arriba. En otras palabras, las leyes de potencia enseñan a

tener en cuenta lo masivo y frecuente pero precisamente para girar entonces la vista hacia lo inesperado e inaudito. Todo un cambio de estructura mental. No porque esto inesperado surgirá inevitablemente: porque *puede* suceder, este es el punto crucial. No hay determinismo.

7.3. Medición de la aleatoriedad/azar

Uno de los más difíciles problemas, en vida tanto como en ciencia, es comprender el azar. Originariamente descubierto en los orígenes de la modernidad gracias a matemáticos que jugaban juegos de azar, como G. Cardano, el problema del azar da lugar muy pronto al nacimiento de la teoría (clásica) de probabilidades. La función de esta teoría era y ha sido siempre la de reducir los umbrales del azar y poder controlarlo. El azar se lo determina, así, a fin de excluirlo o dominarlo. Posteriormente, ello dará origen a la teoría de riesgos.

De manera atávica, a gente prefiere tener malas explicaciones a no tener ninguna explicación. Y entonces prefieren una explicación ad hoc, antes que asumir el azar. Literalmente, el azar quiere decir que en ocasiones hay cosas que suceden sin ninguna explicación; esto es, sin una explicación mejor que otra. El problema de la medición del azar dio origen a uno de los núcleos más importantes en el trabajo con fenómenos y sistemas de complejidad creciente, la teoría de la información algorítmica, desarrollada originariamente por Kolmogorov.

La complejidad de Kolmogorov, como también es llamada, constituye un campo de las matemáticas y de la teoría de la computación. Su elegancia e importancia radica en que consiste en una demostración por imposibilidad, algo análogo a lo que acontece con buena parte de la obra de Cantor, o con el problema de los tres cuerpos de Poincaré, el teorema de Gödel o el problema de la detención (*Haltungsproblem*) por parte de Turing, entre otros. Se llama complejidad de Kolmogorov a la longitud del programa más corto posible para describir un sistema. Así, si un programa determinado es compresible, se dice que es más trivial o irrelevante; si, por el contrario, es incompresible se dice entonces que contiene mayor aleatoriedad; y entonces, a la manera de una máquina de Turing, lo mejor que se puede hacer es echar a rodar el programa, y se lo va comprendiendo a medida que el programa corre. La vida misma, o el conocimiento, o la naturaleza son esta clase de programas esencialmente incompresibles. Y por ello mismo están marcados por azar o aleatoriedad. Es decir, no existe un algoritmo que permita comprimir la información de suerte que se produzca una fórmula que permita anticipar o prever acontecimiento futuros posibles. Se habla entonces, con propiedad, de complejidad algorítmica o de complejidad algorítmica.

Exactamente en este sentido cabe subrayar una idea enunciada con anterioridad. Pensar en términos de complejidad consiste en indeterminar el mundo y los fenómenos, una idea claramente contraintuitiva y totalmente divergente de toda la historia de la cultura. La ciencia y la filosofía occidentales. En verdad, el azar es indomable: hay cosas que suceden sin ninguna razón y hay cosas que suceden sin ninguna razón pero mejor que otras. La bestia de la ciencia normal es realizar predicciones retrospectivas,, lo que es, en verdad, hacer mala ciencia, o mala reflexión.

En otras palabras –y es una idea que emerge de las lógicas no-clásicas en general- es imposible tener una teoría consistente. Incesantemente nos encontramos en un mundo de imposibilidades y la tarea consiste en descubrir las posibilidades dentro de las mismas imposibilidades. Hay que decir que en complejidad podemos medir la incertidumbre. Se trata, de una medición por imposibilidad. Exactamente en esta dirección es que se debe poder tener una estructura de mente abierta; es decir, no-algorítmica en ninguna acepción de la palabra, y por consiguiente incompresible.

7.4. Metaheurísticas

La ciencia clásica posee una determinada heurística. En este sentido, se dice que tiene una cierta capacidad para resolver un problema, o bien, lo que es equivalente, que se caracteriza por una determinada capacidad de innovación o creatividad. En verdad, la mejor manera de resolver un problema consiste en innovar; y una manera de innovar es resolviendo problemas.

Las metaheurísticas constituyen una de las herramientas distintivas de las ciencias de la complejidad. Se trata, simplemente de la capacidad para identificar –con cualesquiera criterios posibles o necesarios- en un tiempo 1 un grupo de problemas; entonces, nos damos a la tarea de buscar espacios de solución. En ciencia en general, siempre que se formula un problema se dejan de atender y de resolver numerosos otros problemas contiguos o en vinculación con el problema identificado o formulado. La ciencia normal se hace trampa, por así decirlo, hablando –erróneamente, en realidad- de delimitación: por ejemplo, delimitación del tema, delimitación metodológica, delimitación del marco conceptual y otras formas semejantes.

Se identifican por tanto grupos de problemas y se trabaja en espacios de solución, incluso con el reconocimiento de que no siempre todos y cada uno de los problemas quedan resueltos. Entonces, en un tiempo 2 se identifica otro grupo de problemas con los criterios pertinentes del caso, y se trabaja, nuevamente en los espacios de solución de los mismos. Sin embargo, siempre, por distintas razones, quedan alguno o unos pocos problemas sin resolver, entonces se los configura en un tiempo 3, y así sucesivamente.

Existen distintas clases de metaheurísticas; así, por ejemplo, metaheurísticas multinivel, híbridas, P y NP, distribuidas, paralelas y muchas más. El campo de las metaheurísticas forma parte en general de las herramientas computacionales, lógicas y matemáticas de la complejidad y forman una de las hebras principales, si cabe la expresión, de la teoría de la complejidad computacional (Maldonado, 2016b).

7.5. Modelamiento y simulación

En el capítulo anterior –No. 6- ya se hizo una presentación sumaria de estas herramientas. De acuerdo con un investigador destacado en complejidad, las ciencias de la complejidad nacen gracias al desarrollo de la computación pero contribuyen asimismo a que la computación se haya desarrollado. El computador y la computación constituyen la forma como, por primera vez, se logra ver y trabajar con la no-linealidad. En términos históricos, en verdad Leibniz y Newton lograron ver la no-linealidad, pero no supieron qué hacer con ella y la linealizaron; eso es el cálculo infinitesimal. La razón por la que linealizaron la no-linealidad es que en su época no existían los computadores y la computación.

De acuerdo con la Unesco, la principal, forma de analfabetismo contemporáneo es el analfabetismo tecnológico. Sin ambages, la inmensa mayoría de las personas no tiene un computador; tienen una máquina de escribir –máquina de mecanografiar-. Manejar un computador significa conocer, apropiarse y trabajar con lenguajes de programación. En este sentido, culturalmente hablando, la inmensa mayoría de la gente tiene un atraso de por lo menos cincuenta años con respecto a la computación. Ciertamente el factor demográfico hará en un futuro inmediato esta cifra disminuir fuertemente.

El analfabetismo tecnológico significa, puntualmente do cosas: la inmensa mayoría de la personas son pasivos ante las tecnologías de la información y el conocimiento –y las demás-. Desiderativamente, las personas deberían ser activas ante estas tecnologías; ello pasa por estudiar, leer y estar en capacidad de escribir código. El alfabeto de las tecnologías, es el código informacional, exactamente igual que la apropiación del alfabeto en cada lengua natural. El alfabeto y su combinatoria.

De la misma manera, dicho analfabetismo consiste en el hecho de que las herramientas informacionales y computacionales logran conocer más a las personas de lo que ellas mismas se conocen a sí mismas. Es, notablemente, lo que sucede con los algoritmos genéticos, el aprendizaje de máquina y el aprendizaje profundo, así como con las ingentes bases de datos que se alimentan día a día gracias, por ejemplo, a las búsquedas de los motores de búsqueda y a las diferentes redes sociales. Cabe recordar aquí una idea básica

válida en numerosos dominios: hay que sospechar de cosas como Facebook, Whatsapp y otras: cuando el producto es gratis, cada quien es (verdaderamente) el producto.

Numerosas consideraciones de tipo ético, político y militar se desprenden del peligroso analfabetismo tecnológico. Las gentes no son conscientes, en absoluto de todo lo que ello comporta. Aquí, por lo pronto, se trata, consiguientemente, de subrayar la importancia y la necesidad de aprender modelamiento y simulación. Las puertas para ello son variadas y bastante menos difíciles de lo que parece.

7.6. Problema P versus NP

Puede decirse que la columna vertebral de las ciencias de la complejidad son los problemas P versus NP, que constituyen el centro de la teoría de la complejidad computacional. Formulados originariamente en el año 2002 como uno de los problemas más importantes en matemáticas, encuentran sus orígenes, sin embargo en 1977 por vía independiente a partir de los trabajos de tres científicos: Cook, Levin y Karp. Los problemas P versus NP. Una vez más, se trata de una herramienta propia de las ciencias de la complejidad. En tanto columna vertebral, todos los demás temas y problemas cuelgan o se desprenden de los problemas P versus NP.

En la base de estos problemas se encuentra el trabajo de D. Hilbert acerca del problema de la detención (*Haltungsproblem*) y, a la vez, las contribuciones de Turing en torno a la distinción entre problemas indecidibles y problemas decidibles. De manera puntual, los problemas en complejidad pueden ser atendido según si implica, y cómo o no, un tiempo polinomial. En caso contrario, se clasifican como problemas cuyo tiempo es no-polinomial. La lógica y la dinámica de los problemas P versus NP consiste en un alejamiento de los problemas fáciles –que se resuelven y se pueden resolver-, para avanzar en la dirección de los problemas que no se pueden resolver en un tiempo polinomial o que no se sabe si es posible hacerlo. Estos son llamados problema relevantes, en general (Fortnow, 2013).

La teoría de la complejidad computacional pone de manifiesto que un problema cualquiera implica un tiempo de computación –es decir, de procesamiento-, y que es en función del mismo como puede abocarse a la solución de un problema determinado. Como se aprecia sin dificultad, las herramientas de la complejidad remiten unas a otras, o aún mejor, se implican, de tal suerte que el avance con una es, paralelamente, el avance con otra.

Los desarrollos en el los esfuerzos por resolver este grupo de problemas ha sido lento pero muy consistente en los últimos años. Ello ha dado lugar a identificación de distintos

espacios de solución de problemas –llamados, en ocasiones, por ejemplo, como espacios P y EXP, asuntos técnicos que deben quedar aquí de lado-.

Es este capítulo de problemas P versus N el que permite establecer, sin ambages, cuáles son propiamente problemas complejos, y cuáles no lo son. Las ciencias de la complejidad no trabajan sobre problemas que no sean complejas, huelga decirlo.

7.7. Lógicas no-clásicas

Las lógicas no-clásicas constituyen un amplio y muy rico abanico reciente de trabajo en complejidad (Maldonado, 2020). Hay que decir de entrada, sin embargo, que no todas las lógicas no-clásicas sirven para un mismo fenómeno, sistema o interés. Más bien, se trata de una gama de opciones que pueden ser empleadas en función del marco o el momento en consideración. Lo que sí es posible establecer, sin embargo, es que varias de las lógicas no-clásicas tienen distintos tipos de conexiones con otras, de suerte que la gama de posibilidades de trabajo y explicaciones es amplia.

Algunas de las lógicas no-clásicas son: la lógica modal, la lógica multimodal, la lógica epistémica, la lógica doxástica, la lógica alética, la lógica de contrafácticos, la lógica difusa, las lógicas polivalentes, la lógica paraconsistente, la lógica erotética y la lógica de la ficción, por ejemplo.

A diferencia de la lógica formal –o lógica formal clásica- que fue entrada considerada por Aristóteles como un *organon*, las lógicas no-clásicas no son un instrumento del conocimiento. Aquí están presentadas como herramientas de las ciencias de la complejidad en el sentido amplio de la palabra, como cuando se dice, por ejemplo, que la ecología es una herramienta para estudiar las crisis del medioambiente, o también las relaciones entre los organismos vivos y el medioambiente. Se trata, simple y llanamente, de una aproximación al proceso de investigación, y con él, a la comprensión y explicación del mundo, la naturaleza y las cosas.

Hay que decir que, de manera genérica, el estudio de la lógica no es muy favorecido en el contexto latinoamericano. Y ciertamente el desconocimiento de las lógicas no-clásicas es amplio y sostenido. También aquí hay un trabajo de educación necesario por delante. La primera responsabilidad recae sobre todos aquellos interesados en el estudio de la vida y de la complejidad en general.

La importancia básica de las lógicas no-clásicas estriba en que, muy ampliamente, en su gama, permiten como ninguna otras de las ciencias, disciplinas y herramientas de la complejidad evitar la más fácil y seductora de todas las tentaciones: el reduccionismo.

En efecto, gracias a este abanico de lógicas es posible comprender que existen y son posibles más de un sistema de verdad, y que el mundo y la vida admiten siempre más de una versión de las cosas – una idea extremadamente difícil en toda la tradición occidental, acostumbrada siempre a la existencia de una verdad única. El hecho de que todas las historias admitan siempre más de una versión no implica, en absoluto, el relativismo, sino mejor aún, una profundización en los procesos de comprensión y nos permite acercarnos algo a la sabiduría. Quizás la última frontera de la buena educación, la buena información, la buena ciencia y la buena filosofía. Algo que quedó en el camino, oficial y sistemáticamente, hace mucho tiempo, atrás.

Conclusiones

Recapitulando: el estudio de los fenómenos de complejidad creciente

Parte de la sabiduría de la vida, de la investigación, pasa por la posibilidad de reinventarse a sí mismo, alguna vez, o de tanto en tanto. La historia de la ciencia, queda visto, es la historia de verdaderas revoluciones. Concomitantemente, se trata, también, de revoluciones en el trabajo y en la forma como la sociedad se organiza. Estas revoluciones no son teleológicas; van emergiendo, se interpretan a sí mismas, y van avanzando, a veces a paso lenta y en ocasiones de manera vertiginosa conformando el mundo siempre en entornos locales. La marca de calidad de la vida es el cambio, la impermanencia; dicho en términos fuertes pero clásicos, la transformación incesante de una forma de energía en otra (primera ley de la termodinámica). Las ciencias de la complejidad, puede decirse, consisten ese tipo de conocimiento sobre lo impredecible, lo indeterminado, lo siempre esencialmente abierto, en fin, la vida misma. Desde cualquier punto de vista, el fenómeno de máxima complejidad posible conocida es la vida. Las ciencias de la complejidad con ciencias de lo que hacen los sistemas vivos para vivir y cómo se hacen posibles, incluso contra toda adversidad. Los seres humanos forman parte del tejido de estos sistemas vivos: la trama. La vida es la mejor metáfora del propio universo. Mientras que los conceptos y las categorías son fijos, las metáforas son figuras vivientes. Como toda la topología, de hecho.

Hay un tema importante pero oculto a todo lo largo de este libro. Se trata de la importancia de las pasiones. Al fin y al cabo es imposible hablar de revoluciones –espirituales, religiosas, políticas, científicas, culturales, artísticas u otras-, al margen de las pasiones. La pasión es la gran maldita en la historia de Occidente. Con la antigüedad greco-romana o sin ella; con el medioevo y el cristianismo o sin ellos, en fin, con la ciencia moderna y sus secuelas, o sin ellos. El protagonismo ha pasado a ser por parte de las emociones. Pero ambas son cosas perfectamente distintas. Esto es gratuito: al fin y al cabo, las emociones residen en

el cerebro, y puede por tanto ser manipuladas, como en efecto lo son. Existe toda una ingeniería social y una muy buena parte de las tecnologías y la ciencia destinadas a esta manipulación.

Semánticamente, lo que ha quedado de las pasiones es el *pathos*. Pero se olvida que este es pasivo. Por el contrario, las pasiones son, siempre, esencialmente activas. Semánticamente, en la ante-escena de Occidente, se llamaba *hybris*. Las pasiones remiten siempre al cuerpo, y el cuerpo fue el bellaco de la historia occidental. Su importancia fue apenas recuperada a comienzos del siglo XX gracias a la Escuela de los Anales, aun cuando las artes siempre lo han rondado, ocasionalmente. El dualismo fue la regla en la historia de esta civilización que ya fallece y da lugar a otra por definición diferente y mejor. Aquí, sólo quiero dejar en evidencia la ausencia de todo lo que se encuentra en la base –subterránea– de la historia de la ciencia y la tecnología en general. Ya vendrá el momento de abrirle un espacio propio a las pasiones y a las relaciones entre educación y pasión, y entre ciencia e investigación y pasiones.

En cualquier caso, la cenicienta de la educación, la cultura y la ciencia en general es el continente de las pasiones, mucho más que simplemente un archipiélago. Después de todo, las emociones se pueden fingir, pero las pasiones no. Hoy, y cada vez, necesitamos de nueva y buena ciencia; y de mucha investigación. En verdad, venimos de una tradición amplia y fuertemente logofóbica (miedo a la ciencia; miedo al conocimiento); en el pasado, hubo siempre, se dijo, que preservar el conocimiento verdaderamente verdadero de la chusma, de la gleba. Al cabo del tiempo, hubo más de uno que logró identificarse con la muchedumbre excluida.

Necesitamos más y mejor investigación, más y mejor información, más y mejor educación. Al fin y a cabo, lo que está en juego es la vida misma. Y la vida se hace posible con más y mejor educación, investigación y ciencia. Frente al miedo al conocimiento que define el pasado, nos abocamos, en el futuro, a una época de luz, de mucha luz. Este libro ha querido mostrar cómo y por qué. Ese ha sido todo el esfuerzo.

En verdad, el conocimiento por primera vez en la historia de la humanidad no es de nadie. Esto es, dicho mucho mejor, se ha convertido en un acervo común. Es esto lo que implica el tránsito hacia la tercera y la cuarta revolución industriales, y de la segunda y la tercera revolución científicas. Y con ellas, en medio suyo, del estudio de los fenómenos de complejidad creciente.

Pensar en complejidad es pensar en posibilidades. Hemos hecho el reconocimiento, al cabo, que existen múltiples realidades; o bien, lo que es equivalente, numerosas escalas y dimensiones de realidad, nunca ya más, una sola. Con ello, igualmente, hemos asistido al descubrimiento de que pensar en complejidad ya no es pensar simplemente en individuos, sino pensar en relaciones, redes, entrelazamientos. Nunca estamos solos; y

hoy más que nunca podemos aprender que nadie viene solo al mundo, ni tampoco nadie se va solo de este mundo. Somos mucho más que cada quien. Este es el horizonte que emerge, sugestivo, de una estructura de mente abierta y nodal. Estamos, en medio de una revolución, y asistimos a la autora, tímida aún, de una nueva civilización.

Nos encontramos con las ciencias de la complejidad. Pero hay que decir que estas Las ciencias de complejidad necesitan una pizca de sabiduría. La enorme dificultad estriba en que mientras que la ciencia, como la filosofía, saben de una propedéutica, no existe una propedéutica para la sabiduría. Esta no se la puede enseñar. Sólo se la aprende. Con una salvedad: una vez que se la ha aprendido o mientras se la está aprendiendo, se la puede compartir. El lenguaje de la sabiduría, todo parece indicarlo, es el ejemplo; simple y llanamente. Jamás la proclama, ciertamente no el sermón, y definitivamente no la cátedra.

Exactamente en este sentido, pesar en términos de complejidad significa exactamente pensar en términos no-algorítmicos. Sin la menor duda, la más difícil de todas las ideas en complejidad. Es decir, pensar –y vivir- sin reglas, sin leyes, sin mandamientos, sin coerciones ni prescripciones de ninguna índole. Una aproximación a esta idea es posible a partir del hecho de que hablamos de una estructura de mente abierta. Y la mente, distinta de la conciencia, el entendimiento o la razón, anida en el cuerpo. La mente es ínsita a la vida misma, desde la célula bacterial, a partir de la división entre células eucariotas y procariotas hasta los seres humanos, pasando por plantas y animales, por hongos y, verosímilmente, virus y microbios. Con una dificultad, en el caso de los seres humanos.

Decía Siddartha Gautama que la mente es un mono loco, borracho, picado por una avispa. Debemos poder, en ocasiones, sospechar incluso de la mente. Al cabo, debemos poder dominar la propia mente. También en esto consiste la sabiduría. En efecto, la percepción nos engaña en ocasiones. En contraste, el cuerpo jamás miente. La dificultad estriba en que nunca nos enseñaron a escuchar el cuerpo. Pues bien, para quien, el cuerpo es la expresión más inmediata de la naturaleza. Platón y todos los que le siguieron y le hicieron caso, nos enseñó a dissociar el cuerpo del alma. Un error; o una mentira que, repetida muchas veces termina siendo una verdad, como bien sabía Goebbels.

Los educadores han venido subrayando, con insistencia pero recientemente, acerca de la importancia del desaprendizaje. Si ello tiene sentido, esta idea se encuentra exactamente en la misma longitud de nada que el estudio de la memoria. En verdad, una de las funciones más importantes de la memoria consiste en el olvido, no en recordar. Las ciencias cognitivas y la medicina en general han arrojado luces refrescantes al respecto. Hay, al cabo, cosas, que merecen ser olvidadas.

En cualquier caso, el ritmo de avance del conocimiento es vertiginoso. Lo que queda por aprender es enorme y debemos poder hacerlo bien, de manera sólida y rápida. Un estudio reciente publicado en la revista *Scientometrics* ponía al descubierto lo siguiente. Sólo la revista *Nature*, que es una de las más prestigiosas en el mundo, publica –en sus diferentes series: *Nature*, *Nature Biology*, *Nature Physics*, *Nature Chemistry*, y demás–, alrededor de 20.000 artículos al año. De hecho *Nature*, como su equivalente *Science*, se publican cada semana. Si se consideran, sólo para mantenerse medianamente al día, algunas de las más prestigiosas revistas sobre ciencia en general –entre otras, por ejemplo, las revistas de la serie *Frontiers*, las distintas revistas de la *PloS*, los *PNAS*, y muchas más– alcanzaríamos una cifra alrededor de 120.000 artículos al año. Más los artículos de revistas menos prestigiosas, los libros, los capítulos de libro, y demás documentos que debemos o que podemos leer. Todo parece resultar, entonces, una tarea quijotesca.

Como se aprecia sin dificultad, mantenerse al día, medianamente informado, es una tarea titánica. Y además, claro, hay que reflexionar. Y siempre, vivir, lo cual tiene sus propios tiempos. Para conocer, todo parece indicarlo, se requiere de mucha pasión. Y tanta más para investigar. La vida no admite dilaciones. De aquello de lo que se trata es despertar sin cesar la alegría de vivir (*joie de vivre*), y las ganas y la voluntad de vivir. Pues bien, esta es imposible sin la mente y la cabeza. Pero encuentra sus motivos en otros espacios y lugares más recóndita. Es desde allí desde donde nace el buen conocimiento; y al cabo, la sabiduría. El tema que se abre entonces ante todos.

Bibliografía

- Anónimo (2016). *Edda menor*. Madrid. Alianza Editorial
- Anónimo, (2015). *Edda Mayor*. Madrid: Alianza Editorial
- Anónimo, (2015). *Cantar de las Huestes de Igor*. Madrid: Miraguano Ediciones
- Anónimo, (2013). *Cantar de Rolando*. Madrid: Cátedra
- Anónimo, (2012). *La búsqueda del Santo Grial*. Madrid: Alianza Editorial
- Anónimo, (2010). *Anónimos islandeses del siglo XIII. Saga de los groenlandeses. Saga de Eirik el Rojo*. Madrid: Siruela
- Anónimo, (2006). *Beowulf*. Bogotá: Carvajal
- Anónimo, (1995). *Celtic Fairy Tales*. London: Senate
- Anónimo, (1981). *Carmina Burana*. Prólogo de Carlos Yarza. Barcelona: Seix Barral
- Bak, P., (1996). *How Nature Works. The science of self-organized criticality*. Springer Verlag
- Ball, Ph., (2018). *Cuántica. Qué significa la teoría de la ciencia más extraña*. Madrid: Turner
- Borges, J. L., (1965). *Antiguas literaturas germánicas*. México, D. F.: F. C. E.
- Borges, J. L., (2012). *Cuentos completos*. Barcelona: Lumen
- Botkin, D. B., (1990). *Armonías discordantes. Una ecología para el siglo XXI*. Madrid: Acento Editorial
- Burckhardt, J., (1952). *La cultura del Renacimiento en Italia*. Buenos Aires: Editorial Losada

- Cassé, M., (2001). *Du vide et de la création*. Paris: Odile Jacob
- Castells, M., (2005). *La era de la información. Vol. I: la sociedad red. Vol. II. Economía, sociedad y cultura. Vol. III: Fin del milenio*. Madrid: Alianza Editorial
- Cipolla, C., (1998). *Allegro ma non troppo*. Barcelona: Grijalbo Mondadori
- Cipolla, C., (1993). *Contra un enemigo mortal e invisible*. Barcelona: Crítica
- Cox, B., & Forshaw, J., (2015). *El universo cuántico. Y por qué todo lo que puede suceder, sucede*. Bogotá: Debate
- Eisler, R., (1997). *El cáliz y la espada. La mujer como fuerza en la historia*. Barcelona: Cuatro Vientos
- Fortnow, L., (2013). *The Golden Ticket. P, NP, and the Search for the Impossible*. Princeton and Oxford: Princeton University Press
- Gilder, L., (2008). *The Age of Entanglement. When Quantum Physics Was Reborn*. New York: Vintage Books
- Gleick, J., (2012). *The Information. A History, A Theory, A Flood*. New York: Vintage Books
- Gould, S. J., (2004). *La estructura de la teoría de la evolución*. Barcelona: Tusquets
- Gribbin, J., (2005). *Historia de la ciencia. 1543-2001*. Barcelona: Crítica
- Heather, P., (2018). *Emperadores y Bárbaros. El primer milenio de la historia de Europa*. Barcelona: Crítica
- Isaacson, W., (2014). *Los innovadores. La historia de los genios que crearon Internet*. Bogotá: Debate
- Jou, D., (2012). *Introducción al mundo cuántico. De la danza de las partículas a las semillas de las galaxias*. Barcelona: Pasado y Presente
- Krsiteller, P. O., (1979). *El pensamiento renacentista y sus fuentes*. México, D. F.: F. C. E.
- LeShan, L., y Margenau, H., (1996). *El espacio de Einstein y el cielo de Van Gogh. Un paso más allá de la realidad física*. Barcelona: Gedisa
- Lévi-Strauss, C., (1964). *El pensamiento salvaje*. México, D. F.: F. C. E.
- Lomas, R., (2002). *The Invisible College: The Royal Society, Freemasonry and the Birth of Modern*

Science. Headline Book Pub. Ltd.

McFadden, J., y Al Khalili, J., (2019). *Biología al límite. Cómo funciona la vida a muy pequeña escala*. Madrid: RBA

Maldonado, C. E., (2020) *Pensar. Lógicas no-clásicas*. Bogotá: Ed. Universidad El Bosque, 2ª Edición (primera edición 2018).

Maldonado, C. E., (2019a) “Quantum Theory and the Social Sciences”, en: *Momento. Revista de Física*, 59E, Octubre, págs. 34-47; <https://doi.org/10.15446/mo.n59E.81645>; disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/momento/article/view/81645>

Maldonado, C. E., (2019b) *Sociedad de la información, políticas de información y resistencias. Complejidad, internet, la red Eschelon, la ciencia de la información*. Bogotá: Ed. Desde Abajo

Maldonado, C. E., (2018a) “Quantum Physics and Consciousness: A (Strong) Defense of Panpsychism”, en: *Trans/from/acao*, Edicao especial, Vol. 41, pp. 101-118, doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0101-3173.2018.v41esp.07.p101>

Maldonado, C. E., (2018b) “La investigación como ludopatía”, en: *Pacarinadelsur*, Año, 10, No. 37, Octubre, Diciembre, ISSN 2007-2309, disponible en: <http://www.pacarinadelsur.com/home/alma-matinal/1677-la-investigacion-cientifica-como-ludopatia>

Maldonado, C. E., (2017) “Tipología de modelos científicos de explicación. Ciencia y complejidad”, en: *Sociología y Tecnociencia*, 7/2, pp. 58-72; doi: <https://doi.org/10.24197/st.2.2017.58-72>; disponible en: <https://revistas.uva.es/index.php/sociotecno/issue/view/62>

Maldonado, C. E., (2016a) “Ciencia vs. Humanidades: una guerra que no es nuestra”, en: *Revista Cronopio*, No. 68, disponible en: <http://www.revistacronopio.com/?p=18073>

Maldonado, C. E., (2016b) “Metaheurísticas y resolución de problema complejos”, en: *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, Vol. 16, No. 33, pp. 169-185

Maldonado, C. E., (2013) *Significado e impacto social de las ciencias de la complejidad*, Bogotá: Ed. Desde Abajo

Maldonado, C. E., (2011) *Termodinámica y complejidad. Una introducción para las ciencias sociales y humanas*. Bogotá: Desde Abajo

Maldonado, C. E., (2005) *Termodinámica y complejidad. Una introducción para las ciencias sociales y humanas*, Bogotá, Universidad Externado de Colombia

Panofsky, E., (1983). *Renacimiento y renacimientos en el arte occidental*. Madrid: Alianza Editorial

Pérez de Antón, F., (2018). *Cisma sangriento. El brutal parto del protestantismo: un alegato humanista y secular*. Ciudad de México: Taurus

Petrarca, Bruni, Valla, Pico della Mirandola, Alberti, (2000). *Manifiestos del humanismo*. Barcelona: Ediciones Península

Rescher, N., (2006). *Epistemetrics*. Cambridge: Cambridge University Press

Reynoso, C., (2019). *Modelos o metáforas: crítica del paradigma de la complejidad de Edgar Morin*. Buenos Aires: Editorial Sb

Rifkin, J., (2011). *La tercera revolución industrial. Cómo el poder lateral está transformando la energía, la economía y el mundo*. Barcelona: Paidós

Roederer, J. G., (2005). *Information and Its Role in Nature*. Springer Verlag

Ruiz, R., Ayala, F. J., (1998). *El método en las ciencias. Epistemología y darwinismo*. México, D. F.: F. C. E.

Russell, S., (2019). *Human Compatible. Artificial Intelligence and the Problem of Control*. New York: Viking Books

Schwab, K., (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Random House

Shannon, C. E., (1948). "A Mathematical Theory of Communication", en: *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, Julio y octubre, págs. 379-423 y 623-656; disponible en: <http://people.math.harvard.edu/~ctm/home/text/others/shannon/entropy/entropy.pdf>

Stadler, F., (2010). *El Círculo de Viena. Empirismo lógico, ciencia, cultura y política*. Ciudad de México: F.C.E.-Universidad Autónoma Metropolitana

Susskind, L., and Friedman, A., (2014). *Quantum Mechanics. The Theoretical Minimum*. New York: Basic Books

Tegmark, M., (2018). *Vida 3.0. Ser humano en la era de la inteligencia artificial*. Barcelona: Taurus

Vedral, V., (2010). *Decoding Reality. The universe as quantum information*. Oxford: Oxford University Press

Watson, P., (2017). *Convergencias. El orden subyacente en el corazón de la ciencia*. Barcelona: Crítica

