La naturaleza no computa: argumentos contra la hipótesis computacional

JEREMÍAS CAMINO
Universidad Nacional de Tucumán
San Miguel de Tucumán, Argentina

DOI: 10.36446/rlf474

Resumen: La hipótesis computacional establece que todas las cosas existentes en el universo computan, y habiendo tenido una primera formulación en la así conocida tesis de Zuse-Fredkin, ha ganado cada vez más adeptos. Una parte de la comunidad científica la adopta como supuesto en sus investigaciones, lo que suele comprenderse como una evidencia a su favor. Este es un sentido ingenuo de evidencia, dado que la misma supone cierta interpretación de los fenómenos para ser catalogados como tales. Por ello, se requiere de un fundamento. En este artículo, luego de pasar revista a una serie de ejemplos, expondremos los tres tipos de argumentos ofrecidos en favor de aquella hipótesis: epistemológico, teorético y ontológico-epistemológico. Seguidamente, detallaremos por qué estos mismos fallan por diversos motivos, para llegar a concluir que ni la naturaleza ni los objetos computan.

Palabras clave: epistemología computacional, tesis Zuse-Fredkin, computabilidad, ontología computacional, tesis Church-Turing.

Nature Does Not Compute: Arguments Against the Computational Hypothesis

Abstract: The computational hypothesis establishes that all things in the universe compute, and having been first formulated in the so-called Zuse-Fredkin thesis, it has gained increasing adherents. Part of the scientific community adopts it as an assumption in their research, which is often understood as evidence in its favor. This is a naive sense of evidence, given that it presupposes a certain interpretation of phenomena to be classified as such. Therefore, a foundation is required. In this article, after reviewing a series of examples, we will present the three types of arguments offered in favor of that hypothesis: epistemological, theoretical, and ontological-epistemological. Subsequently, we detail why these arguments fail for various reasons, leading to the conclusion that neither nature nor objects compute.

Keywords: computational epistemology, Zuse-Fredkin thesis, computability, computational ontology, Church-Turing thesis.

de modo que, acerca de esto, conviene que aceptemos un mito verosímil y no buscar más allá.
Platón, *Timeo*, 29d1-3

1. Introducción

Como es ya ampliamente sabido, los procedimientos computacionales se utilizan en prácticamente todas las investigaciones científicas. En paralelo al aumento de este uso desde las primeras computadoras de 1930, también se ha ido asentando y divulgando la que aquí denominaremos hipótesis computacional: todas las cosas existentes en el universo realizan por sí mismas una computación, es decir, computan. La primera formulación de esta hipótesis, según se reconoce en general, fue realizada independientemente por Zuse (2012) y Fredkin (1990), y enuncia que el universo computa cual autómata celular. Usualmente se la conoce como tesis de Zuse-Fredkin. En los últimos cincuenta a sesenta años, esta tesis, por diversos motivos, ha ido cobrando cada vez más notoriedad, y, con el inicio del nuevo siglo, surgieron nuevos proyectos que, de manera individual o colectiva, renovaron los esfuerzos para una nueva fundamentación. Aunque existan nombres que denotan diferentes corrientes según se enfatice en diversos aspectos, sin embargo, la cuestión principal se mantiene incólume. Pues, puede reconocerse fácilmente que comparten la misma convicción en la hipótesis computacional y en la epistemología computacionalista. Nos referimos a la filosofía digital (por ejemplo, Fredkin, Wheeler, Chaitin, Wolfram), el pancomputacionalismo (por ejemplo, Lloyd, t'Hooft), la computación natural (por ejemplo, Deutsch, Dodig-Crnkovic) y el informacionalismo (por ejemplo, Wiener, Susskind, Zenil). Junto a obras y artículos publicados de modo individual, caben destacar los compendios de artículos siguientes: *Thinking Machine and the Philosophy of Computer Science* (Vallverdú 2010), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation* (Zenil 2012a), *Computer Nature* (Dodig-Crnkovic y Giovagnoli 2013) y *Philosophy and Methodology of Information* (Dodig-Crnkovic y Burgin 2019).

Consideramos que esta no es una mera cuestión intelectual. Las décadas de 1930 y 1940 dan origen a una cosmovisión (tal como históricamente se conceptualiza), que luego no solo fue ahondada y expandida hacia diversas áreas, sino que pareciera haberse enraizado en el sentido común. Así, en sus dos trabajos pioneros de 1948 y 1950, Wiener había afirmado que, desde la perspectiva de los procesos centrados en el *feedback*, no cabe hacer ninguna diferencia entre ciertos artefactos, algunos tipos de sistemas inorgánicos y los seres vivos en general (Wiener 1948), lo que resulta en que el concepto de vida no sea un criterio suficiente para distinguirlos (Wiener 1988). Turing, en un famoso artículo (Turing 1950), había argumentado a favor de adjudicar la capacidad de pensar a las máquinas, y, en 1952, publicó los modelos matemáticos de los patrones de ciertos procesos biológicos (Turing 1952), dando un impulso significativo al estudio de la morfogénesis y la subsiguiente modelización computacional (que él mismo allí ya propugnaba). Von Neumann en 1958, aunque sin ser el primero, también modelizó matemáticamente el cerebro humano a partir del parangón con la computadora (von Neumann 2012). Y, en la década de los ochenta, Minsky analizó la mente en analogía con el software (1988). Desde esta perspectiva, no resulta extraño que el heliotropismo sea concebido como una de las formas de computar información solar (Beavers y Harrison, 2012).

Por todo lo anterior, creemos necesario analizar críticamente la hipótesis computacional. Para ello, en primer lugar, pasaremos revista a algunas investigaciones científicas en campos específicos donde opera la convicción en dicha hipótesis, con el fin de ilustrar con cierto detalle la concepción así derivada. En segundo lugar, nos abocaremos a estudiar aquellos trabajos donde se ofrece algún tipo de justificación. El análisis de estos últimos artículos revela que hay tres tipos de argumento a favor de la hipótesis computacional:

epistemológico (amparado en los éxitos de la concepción computacionalista relativos a su poder explicativo, así como a la resolución de ciertos problemas vigentes, y también a la creación de una nueva metodología), teorético (consistente en la equivalencia formal de las representaciones computacionales de los diversos objetos de investigación) y ontológico-gnoseológico (cifrado en una reversión del tradicional argumento ontológico). Sin embargo, demostraremos, en tercer lugar, que tales argumentos fallan por uno u otro motivo: el epistemológico porque no ofrece razones concluyentes respecto a una real autonomía de la concepción computacional ni tampoco para la necesidad de una transformación en cuanto a la nueva perspectiva; el teorético por limitaciones formales que imposibilitan la confirmación de la pretendida capacidad computacional de los objetos de estudio; y el ontológico-gnoseológico porque evidencia la imposibilidad de ir más de allá del mero carácter hipotético.

Todo esto permite concluir principalmente que, si no hay más argumentos que esos en favor de tal hipótesis, entonces las cosas existentes en el universo no computan.

2. *Breve panorama de la hipótesis computacional inserta en trabajos de campo*

A los mencionados compendios de artículos los integran, entre otros, investigaciones científicas de diversos campos que operan con la que denominamos hipótesis computacional. Si bien resulta importante analizar y discutir cada uno de ellos con mayor detenimiento, dejamos en nota al pie los detalles principales de los respectivos desarrollos, para concentrarnos en exponer qué concepción de la realidad deriva de la asunción de tal hipótesis. Así, por ejemplo, el artículo de Ehrenfeucht *et al.* (2012) expone un modelo computacional para estudiar el desarrollo vital de las células. Según afirman, su utilidad radica en que ayuda a comprender los procesos de las células en el sentido especial de la "computación natural de las reacciones químicas" (p. 190) que ocurren en ellas.[1] Por su parte, Mar-

[1] Para ello, formulan "un modelo basado en las interacciones de las reacciones bioquímicas" (en Ehrenfeucht *et al.* 2012: 191), el cual es una representación simplificada (o "abstracta", según sus palabras) construida a partir de: i) la teoría de conjuntos, elección esta sustentada en cierta interpretación de cómo ocurre una reacción bioquímica, y ii) utilizando un procedimiento de cálculo equivalente a una máquina de Turing determinística (p. 193), que se corresponde con la interpretación del punto i) (aunque los autores aclaran que es posible

genstern (2012) aplica el autómata celular para modelar el comportamiento de cierto tipo de bacterias. Tal representación, asegura, no solo permite mejorar la comprensión de este fenómeno, sino que, del hecho de que la misma sea generada a partir de unas pocas reglas sencillas (que es la característica sobresaliente del autómata celular), demuestra la simplicidad subyacente a la compleja organización vital, que opera dentro de las circunstancias generales determinadas por las leyes físicas (p. 210).[2] Bull *et al.* (en Dodig-Crnkovic y Giovagnoli 2013) proponen un modelo para estudiar el movimiento vesicular en las células, en un medio químico típico de Belousov-Zhabotinsky, mediante un modelo computacional de máquina no organizada (concepto ideado por Turing a finales de la década de 1940). Para los autores, no solo se trata de un modelo, sino de comprender la interacción entre los elementos materiales en tanto realizan una computación (p. 189).[3] Riofrío (2010) basa toda su interpretación computacional en la conceptualización de la biología genética de la cadena de ADN (p. 54). Y lo generaliza hasta decir que todos los sistemas vivos se distinguen de los no vivos por su dependencia del signo, es decir, según el autor, del intercambio de información que es computada para su autosubsistencia. Asevera que la tesis, "que empieza a ganar aceptación" en la comunidad científica, afirma que "la computación natural en sistemas biológicos es real. Consecuentemente, nuestra estrategia descansa en la búsqueda de métodos que vayan tras las pistas que nos permitan descubrir su naturaleza" (p. 60; traducción propia).

extender el cálculo a una no-determinística, p. 206). Este formalismo lo aplican al estudio específico de la producción de una proteína a partir de un gen.

[2] El autor sigue la sugerencia experimental (en Margenstern 2012: 213) de que las colonias de bacterias alteran su configuración espacial según el ambiente (y muy particularmente el de los antibióticos), lo que lo lleva a remarcar la importancia de estudiar la configuración geométrica de las mismas. Para ello, propone "simular el crecimiento [bacterial] observado mediante un autómata celular hiperbólico" (p. 214). Si bien los autómatas celulares se pueden expresar matemáticamente, lo que suele utilizarse son los pictogramas que generan. De esto mismo se vale el autor para así comparar las formas observadas en el laboratorio con las formas generadas mediante el autómata. Propone pensar, entonces, a las colonias de bacterias como desarrollando una configuración de heptágonos en una geometría hiperbólica. Luego de especificar las características de la generación de heptágonos en tal tipo de geometría, con lo cual puede obtener las reglas básicas para la generación del correspondiente autómata celular (en sus clásicas funciones recursivas: p. 222), se expone la "simulación" así lograda (pp. 223 ss.).

[3] Los autores proponen esquematizar el movimiento vesicular en términos de un modelo de "colisión" (Bull *et al.*: 189), elección basada en cierta interpretación de las características del fenómeno en estudio, que, según sostienen, se amolda a la idea de cómputo natural realizado por los elementos interactuantes. Luego, exponen lo que llaman "experimentos" computacionales que resultan de dicho modelo y de modificar diversas variables (pp. 192 ss.).

Este breve recorrido muestra que tales artículos suponen la hipótesis computacional y sugieren, en cierto modo, que cada investigación en términos computacionales es un apoyo evidencial a la misma. Ahora bien, aunque esta lista somera pueda ampliarse, sin embargo, es notorio que los mismos suponen una interpretación de los hechos que estudian para que sean considerados como evidencias; en especial, suponen que la posibilidad de modelizar es ya un indicio para concebir la computación natural. Por otro lado, no es cierto que esta sea la opinión común en la comunidad científica, incluso aceptando la cuasi ubicuidad de la computación en su labor. Basta con constatar, por ejemplo, en sendas introducciones al estudio de la computación como herramienta en la investigación en economía y sociología (Billari et al. 2006) o en física (Klein y Godunov 2006), para convencerse de esto. Es preciso, pues, analizar ambos puntos.

Como hemos anticipado, las razones que sostienen la hipótesis computacional pueden hallarse en trabajos en los cuales encontramos tres tipos de argumentos. Analizaremos cada uno en el siguiente orden: epistemológico, teorético, ontológico-gnoseológico.

3. Argumento epistemológico

Un primer tipo de justificación radica en los frutos o consecuencias positivas que se obtienen de adoptar la hipótesis computacional en el plano explicativo o teórico. Tal es el caso de la propuesta de Bauer (2012) de una matemática intuicionista sustentada en procedimientos computacionales para la comprensión de las verdades matemáticas, o bien la de Nicolaidis (2010) en la que se resuelven determinados problemas vinculados a la física cuántica y la teoría de la relatividad, o la de Wu (Wu 2012; Wu y Brenner 2017; Wu y Wang 2023) que, remarcando la omnipresencia del concepto de información, permite generar, no solo una explicación total de los fenómenos del universo, sino la unificación de todas las ciencias. En cualquier caso, el argumento de peso apunta hacia la *aceptabilidad* de la misma en función de considerar el carácter necesario de la transformación que debe operar la ciencia en su estado actual. Dicho de otra manera, depende de cuán imperioso sea el cambio. Una defensa epistemológica que resulta interesante por abordar diversos aspectos del asunto, de forma coherente y atractiva, fue elaborada por Chaitin (2007). Si bien su trabajo se enmarca en una disputa con Fredkin y Wolfram al respecto del concepto de la filosofía y física digitales, hace explícito el hecho de que la teoría de la computación que comienza con los trabajos de Turing implica una transformación en al menos dos ámbitos: el epistemológico y el ontológico. En relación al primero que nos interesa en este momento, propone comprender una teoría científica cual "programa computacional" que calcula teoremas matemáticos, así como hechos físicos. En este sentido, retomando el quinto lema del *Discurso de metafísica* de Leibniz (Leibniz 1981), plantea que una teoría, aunque simple en sus principios, debe ser tan compleja como los hechos de los que da cuenta. Pero, la simplicidad de principio es, aquí, interpretada en términos computacionales, siguiendo el teorema de complejidad de Kolmogorov: una teoría debe ser el programa más corto de todos los posibles (Chaitin 2007: 286). De este modo, la teoría cumple con la afirmación: "comprensión es comprimir" (Chaitin 2007: 286). Dados los teoremas de inconsistencia e incompletitud de Gödel, así como el teorema del no detenimiento de Turing (*Halting Problem*), existirán tesis matemáticas y hechos físicos indemostrables, lo cual implica la falsedad del principio leibniziano de razón suficiente. Y finalmente, la concepción computacionalista de la teoría tiene ventajas comparativas con la concepción no computacionalista, particularmente en física: así, las teorías físicas actuales operan con el conjunto de los números reales y el supuesto del continuo. Pero Chaitin argumenta que no hay necesidad de continuar ni con los números reales, sino con bits, ni con el continuo, sino con el discreto (Chaitin 2007: 290-292), ambas características propias de la interpretación computacionalista. Ofrece las siguientes razones.

Primero, la inmensa mayoría de los números reales no son computables, y alguno de ellos ni siquiera se pueden nombrar. Segundo, en el mejor de los casos, los experimentos no trabajan con más de veinte decimales. Tercero, el principio de incertidumbre de Heisenberg conduce a que la más pequeña de las escalas de medida esté imbricada con la más alta de las energías, lo que implica que la realización de experimentos dependa fuertemente de la inversión económica. Al proponer como concepto principal el bit, entonces los planteos se formulan en términos de información y no de energía. Cuarto, la investigación de Hawking y Bekenstein sobre la termodinámica de los agujeros negros, sugiere que cualquier sistema físico puede contener únicamente una cantidad finita de información (o número finito de bits), cuyo máximo posible está determinado por lo que se conoce como la constricción de Bekenstein. Quinto, las fluctuaciones espontáneas en el vacío cuántico suponen una evidencia contraria al continuo.

Cada uno de estos aspectos no es, por supuesto, incuestionable. La interpretación que ofrece Chaitin de la teoría como un cómputo supone una formulación axiomática, acabada y autónoma; aun dejando de lado que no todas las teorías científicas permiten tal presentación (aunque sí la física y ciertas partes de la matemática, que son las que más le interesan), tal esquematización está lejos de reflejar real y completamente una teoría. La epistemología lakatosiana (1975) deja entrever con bastante claridad las diferentes capas en que se estructura una teoría, y cómo el tiempo las va transformando en formas desiguales. En rigor, además, es casi imposible prácticamente el acabamiento cúlmine de una teoría. Y, finalmente, dotarla de autonomía es un sinsentido fuera de las consecuencias ontológicas del computacionalismo (aunque revisaremos este punto específicamente en el siguiente apartado, esto significa que, dado que toda cosa existente computa, entonces también lo hace una teoría).

El criterio de incomputabilidad aplicado a los números reales no tiene por qué ser eliminatorio. Un número se dice de muchas maneras: efectivamente, la representación ordinal y la algebraica exhiben las características que Chaitin expresa; pero frente a esa indeterminación existen la representación geométrica o la representación en series. Así, por ejemplo, si, por un lado, π expresa una relación entre dos magnitudes de una figura geométrica exacta y perfectamente determinada (como es el radio y el perímetro del círculo), por otro tiene una definición dada por la serie infinita cuya fórmula es la de Madhava-Leibniz. Entonces, dado que no toda la entidad de un número se agota en sus propiedades ordinales y algebraicas, se sigue que un enfoque matemático no sea excluyente de otros.

Los argumentos en favor de la naturaleza discreta de los fenómenos tampoco son concluyentes: la discusión sobre el continuo y el discreto, en el mejor de los casos, depende del fenómeno que se estudie. Lesne (2007), aunque basado en la no indiscutible tesis einsteiniana de la independencia de la realidad frente a la teoría (Einstein, Podolsky y Rosen 1935), muestra, con suficiente detalle y ejemplos, los factores experimentales físicos que son determinantes en la elección de una u otra perspectiva.

Los extensos estudios que realizaron tanto Kuhn (2010) como Feyerabend (1975), más allá de la cuestión razonable de qué enfoque o explicación epistemológica adoptar, enseñan la complejidad que existe alrededor de una teoría científica. Desde ambos enfoques se puede justificar que el computacionalismo sea *posiblemente* una nueva epistemología en ciernes, pero no más que ello. A favor de esta posibilidad, uno de los aspectos que suele tomarse como novedoso es la metodología computacional, aunque no resulte tan claro su estatus diferenciado. En efecto, tal método puede entenderse como medio genuino para la obtención de conocimiento; a este respecto, Colburn y Shute (2010) justifican un lugar propio para el conocimiento computacional resultante de su metodología, ubicado entre la ingeniería y la matemática. No obstante, tal método también puede ser visto como no otra cosa que una herramienta (como en el evidente uso de las modelizaciones), pues las computaciones se realizan a partir de los conocimientos obtenidos ya previamente, sin que sus procesos hayan intervenido de forma decisiva. En este sentido, tal método ocupa un lugar subsidiario o coadyuvante de un método más amplio. Esto es tanto más visible, por cuanto las computaciones se aplican a entidades matemáticas interpretadas por una teoría, lo que indica que la computación es secundaria. También se ha hecho énfasis en las nuevas experimentaciones que habilita el autómata celular, que conducen a un desdibujamiento de los límites entre la experimentación tradicional y la virtual, tal como defiende Durán (2010). Ahora, en los casos en que se aplica a fenómenos observables en condiciones de laboratorio, los autómatas celulares dependen de la teoría, paradigma o programa de investigación que da el marco general de la experimentación. Es decir, la teoría determina los hechos tanto como lo que computan los autómatas.

Las consecuencias ontológicas de la teoría de la computación, sobre las que trabajaremos en el próximo apartado, apuntan en la dirección de una nueva cosmovisión en sentido kuhniano. Asimismo, puede notarse la presencia de hipótesis que "nacen muertas", que es la forma en que Feyerabend explica parte del surgimiento de nuevas epistemologías y su renovación sensorial e intelectual subsiguientes, tal como fueron las ideas de Galileo Galilei en su tiempo. Pero, en vistas de todos los cuestionamientos anteriores, la ponderación de los factores que favorecen una efectiva transformación, es una cuestión de tiempo, indecidible en el momento actual más allá de la situación controversial del asunto.

4. *Argumento de la equivalencia: computar y calculabilidad efectiva*

Cottam, Ranson y Vounckx (2013) hacen explícito un planteo que puede percibirse presente en la mayor parte de las propuestas que sostienen la hipótesis computacional: "¿Computa la naturaleza? Habiendo hecho modelizaciones computacionales de la naturaleza, debemos responder definitivamente que sí. Aunque no podemos saberlo con certeza" (p. 23; traducción propia). Ahora bien, no puede aceptarse semejante afirmación sin antes saber cuál es el significado de computar para asignarlo a la naturaleza, por un lado, y qué tipo de razonamiento permite la inferencia de la modelización a lo modelado. Estudiaremos ambas cuestiones a continuación.

Cottam, Ranson y Vounckx (2013: 24) definen computar como un proceso que lleva a cabo un sistema físico que produce información (*output*) a partir de otra receptada (*input*). Un planteo prácticamente idéntico es el de Dodig-Crnkovic: "Computación es en general definida como cualquier tipo de procesamiento de información" (2010: 38; traducción propia). Deutsch (2012) asume la existencia de dos sentidos de computar. En primer lugar, afirma que los sistemas físicos computan refiriendo al proceso reglado por leyes físicas que conduce del estado inicial (o *input*) hacia el estado final (u *output*). En segundo lugar, computar es el proceso físico que realiza una computadora o el cerebro para "descubrir, demostrar o utilizar propiedades de objetos abstractos, como número o ecuaciones" (Deutsch 2012: 557), con los que se formulan las leyes físicas. Deutsch felizmente nota que, así, a casi cualquier cosa puede aplicarse el concepto de computación.[4] Según recogen Blanco, García y Cherini (2011: 114-115), Putnam y Searle sostienen que este tipo de definiciones tornan trivial tal concepto. Ahora bien, esta objeción no resulta significativa por varios motivos. Una universalización análoga no presenta problemas para otros conceptos caros a la ciencia, como son los conceptos de materia y energía, y, sin embargo, son plenamente aceptados. Aún más considerando que aquellas aseveraciones se realizan en el contexto propiciado por la probable renovación epistemológica que hemos desarrollado en el apartado anterior. Y finalmente, los autores de este enfoque, en general, asumen una filiación con la teoría de la información: así, Zenil (2012b) y Dodig-Crnkovic (2010) coinciden en la equivalencia entre computacionalismo y filosofía de la información. Al respecto del informacionalismo, si bien es cierto que, como suele reconocerse, la teoría de Shannon ha constituido un momento bisagra, sin embargo, la cibernética de Wiener ofrece con mayor claridad y énfasis la convergencia entre sistemas físicos en general y su relación con la información. Pues, tal como Wiener explica (1948), los sistemas vivos, no vivos y ciertos artefactos *intercambian información*, por la tendencia de todo sistema a tener un comportamiento neguentrópico (es decir, un impulso excepcional hacia la autopreservación en un universo donde la regla es la no disminución de la entropía). En este sentido, es fácil notar que el procesamiento de información de tales sistemas es un "hecho computacional". Así pues, el problema no es la trivialidad derivada de la universalización, sino el fundamento de la misma: la definición de computación y la consiguiente comprobación de que la naturaleza computa. Es decir, ¿cómo se define el concepto de computar para afirmar que todo sistema computa y de qué manera se puede, si es que se puede, comprobarlo?

Atendiendo a que Cottam, Ranson y Vounckx refieren a las modelizaciones, podremos indagar este cuestionamiento partiendo justamente de ese punto. Pues, tal como hemos reseñado en un apartado anterior, los

[4] Ni en este trabajo, ni en otra obra más extensa (Deutsch 1999), justifica la razón de utilizar el concepto de computar para determinar los procesos físicos, en lugar del concepto de entropía de la mecánica estadística que suele emplearse desde que Boltzmann lo propusiera.

modelos computacionales se utilizan en investigaciones científicas concretas. Y sabemos que existe una gran variedad de modelos que se caracterizan precisamente por su capacidad de computar. Si tales representaciones son un indicio de la computación en la naturaleza, entonces bien podría preguntarse: ¿qué es lo que hace a tales modelos sistemas computacionales? Para obtener una respuesta, se requiere de la definición de computar. En este aspecto clave, si bien los autores que defienden la hipótesis de la computación natural remiten a los trabajos de Turing, sin embargo, es la tesis de Church-Turing la más invocada para tal fin. Pues, la interpretan en tanto garantía de la equivalencia entre cualquier modelización computacional, y, así, como base de su universalización ontológica del concepto de computar. Sin embargo, esta es una lectura equivocada de tal tesis. A continuación, expondremos por qué.

En su famoso artículo de 1936 (Copeland 2004), Turing propone el concepto de máquina computacional, procedimiento formal que demuestra ser eficiente para el cálculo finito de números.[5] A su vez, demuestra y expone la existencia de otro procedimiento, que denomina máquina universal, que es equivalente a cualquier máquina computacional que se pueda proponer, y, por lo tanto, podría entenderse como un procedimiento o cálculo único, en ese sentido formal. Turing también señala allí que el concepto de "calculabilidad efectiva" de Church, acuñado en un artículo del mismo año (Church 1935) y específicamente relacionado a su cálculo lambda, es equivalente a su propio concepto de computabilidad. Como informa Copeland (2004: 104), fue Kleene quien en 1967 bautizó tal equivalencia como tesis de Church-Turing, de enorme peso en la teoría computacional.

Ahora bien, la tesis adolece de cierta imprecisión, al menos en la primera mitad de su formulación, tocante al más deseable concepto de "calculabilidad efectiva". Ya en los años previos a la publicación de Church, Gödel lo había rechazado durante un intercambio con este, debido a la ausencia de una formulación lógica de las propiedades del concepto de "cal-

[5] En el artículo, una máquina queda definida mediante los elementos siguientes: una cinta en la que se inscriben símbolos (0, 1, blanco), configuraciones de la máquina (b, c, f, e), comportamientos de la máquina en función de la configuración y del símbolo actual de la cinta (los cuales son: mover a la derecha, mover a la izquierda, borrar, imprimir). Almansa *et al*. (2012: 219) la definen en términos más generales de la siguiente manera. Una máquina de Turing es una tupla (E, K, B, Q, q0, f, F), donde, i) E es el conjunto de símbolos de entrada, ii) K es el conjunto de símbolos de la cinta (al cual pertenece E), iii) B es un símbolo especial, que pertenece a K pero no a E, y representa el espacio en blanco; iv) Q es el conjunto de estados, v) q0 es el estado inicial (que pertenece a Q), vi) f es una función de aplicación o de transición tal que, para cualquier estado de Q y un símbolo de K, habrá un movimiento (derecha, izquierda, parada), vii) F es el conjunto de los estados finales de la máquina.

culabilidad efectiva" (Davis 1982). En otras palabras, qué significa en términos lógicos. En 1952 Kleene afirmaba que el concepto era intuitivo pero vago. Pues, en efecto, parece en principio aceptable afirmar que un objeto (función matemática, conjunto, teorema, etc.) es computable si existe un procedimiento tal que, dada ciertas condiciones iniciales (función, valores iniciales, axiomas, etc.), derive todos sus argumentos (dominio, teoremas) o a él mismo (valor, teorema). Sin embargo, de esta aserción solo puede garantizarse su corrección formal para casos específicos, pero no en términos universales. Es decir, que solo es válida cuando están perfectamente especificados (en sentido lógico) objeto y procedimiento. La máquina de Turing, el cálculo lambda de Church, el procedimiento de Gödel y el cálculo de Post, son ejemplos de ello. Justamente para estos es correcta la pretensión universal de Church porque, como fue demostrado tempranamente, estos mecanismos formales refieren a funciones recursivas, lo que los vuelve equivalentes. Eso conduce a enunciar que la clase de todas las funciones (efectivamente) calculables es idéntica a la clase de todas las funciones recursivas (Murawski, 2004), que es como suele entenderse la tesis de Church-Turing. Esto significa que las funciones recursivas son calculables, pero no es cierto que todas las funciones lo sean (ni todos los teoremas). Existen serios problemas lógicos para ir más allá de este límite. El ya referido por Gödel es uno de ellos: Copeland (2004) indica en el concepto de efectividad la existencia de elementos extrateóricos subjetivos, que Shapiro (2005) entiende como característicamente psicológicos. Además, se encuentra la dificultad para definir en términos lógicos el concepto de función, o el concepto de conjunto de manera precisa.

Así pues, la tesis de Church-Turing no puede ser demostrada lógica-matemáticamente. Shapiro (2013) informa sobre los intentos de Gandy y de Mendelson de una demostración rigurosa del mismo, pero que han sido debatidos por Folina y por Black. En tal situación, lo único que se ha hecho fue proponer diversos procedimientos de cálculo e intentar demostrar la equivalencia particular con la computabilidad de Turing (que es el sentido extensional del que habla Shapiro 2005). Murawski (2004: 60 ss.) clasifica las pruebas aducidas en favor de tal tesis en tres tipos: i) los heurísticos (manera en que lo entendió Gödel), que incluyen funciones computables particulares que se demostraron recursivas (agregando que no ha habido hasta ahora ningún ejemplo de función computable no recursiva) y métodos que obtienen funciones computables que son también recursivas; ii) análisis teoréticos de procesos de computación, que demuestran que tales métodos se aplican a funciones recursivas, como el argumento de Turing; c) formulaciones matemáticas diferentes de la computabilidad y que también afectan a funciones recursivas. Esto da como resultado diferentes nociones de computación, al menos en lógica y matemática: 1) definición algebraica, 2) definición abstracta de máquina matemática; 3) definición dentro de sistemas formales. Copeland (2004: 104) enumera otros cálculos para los que existe una demostración de equivalencia: la máquina registradora de Shepherdson y Sturgis, los sistemas canónicos y normales de Post, la definibilidad combinatoria de Schönfinkel, los algoritmos de Markov, y la noción de recuento de Gödel. No por otra razón, la mayoría de los modelos computacionales de los trabajos de la computación natural introducen, justamente, funciones recursivas.

En resumen, el problema formal de "calculabilidad efectiva" en la tesis de Church-Turing conduce a afirmar que "computar" se dice de muchas maneras, tantas como mecanismos de cálculo haya. Todavía existe una condición teorética que justamente impide la existencia de una única definición, conduciendo inevitablemente a esta multiplicidad característica. Pues, de lo contrario, existiría una definición de cómputo que permitiría desarrollar un método por el cual se determinara exactamente y a priori si, dado cualquier objeto (función, teorema, etc.), es o no computable. Pero esto es equivalente a tener un procedimiento decisional lógicamente contradictorio con el teorema del *Halting Problem*.

Estas consideraciones formales que atañen al concepto de computación, afectan al corazón de toda modelización computacional, tal como la que figura en la aseveración paradigmática de Cottam, Ranson y Vounckx. En primer lugar, la imposibilidad tanto de garantizar un único sentido de computar como de demostrar la equivalencia lógica entre mecanismos computacionales de manera a priori, torna incierta e insegura su adjudicación a los sistemas físicos. En segundo lugar, incluso si se aceptara provisionalmente la explicación de Deutsch (2012) respecto a que todas las funciones utilizadas por la física son calculables (lo que no es enteramente cierto), esto no significaría un apoyo a la hipótesis computacional, sino antes bien, una expresión de la caución metodológica de plantear problemas que sean matemáticamente resolubles. Lo cual, obviamente, no garantiza que a futuro aparezcan ecuaciones físicas para funciones no computables. Estas limitaciones posibilitan únicamente la afirmación de que el modelo computa, en tanto se ajuste a alguna de las representaciones computacionales equivalentes (o bien se demuestre como tal). Todas estas razones nos conducen a sentenciar que argumentar que lo modelado computa porque el modelo lo hace es cometer la falacia de afirmación del consecuente.[6]

[6] Si todos los sistemas físicos computan, entonces existe al menos un modelo computacional para cada uno de ellos. Existe al menos un modelo computacional para cada sistema, por lo tanto, los sistemas físicos computan. Floridi (2011) también reconoce esta falacia lógica, pero

Podría sostenerse que se realiza un razonamiento abductivo. Entre los ya referidos, un ejemplo destacable lo constituye la obra quizás capital de Wolfram, *A New Kind of Science* (2002). La principal intención de la misma es fundamentar y ahondar la así conocida tesis de Zuse-Fredkin, que plantea que el universo computa como un autómata celular. Wolfram ilustra cómo es que pocas reglas simples pueden generar comportamientos complejos mediante el procedimiento no formal de representación en los famosos pictogramas cuadriculados (o *rechnender Raum* zuseano). Y a lo largo de los capítulos, va exponiendo cómo se pueden construir autómatas celulares para estudiar diferentes campos de las matemáticas (números enteros y su álgebra, funciones, etc.), en física, en la teoría del caos, entre otros. En el capítulo 11 expone la existencia de un autómata celular universal y demuestra, otra vez no formalmente, que es capaz de "emular" cualquiera de los 255 autómatas específicamente estudiados en su obra, así como también la máquina universal de Turing. A la vez, también demuestra (no formalmente) que la recíproca es igualmente válida. Todas las pruebas debidamente formalizadas fueron elaboradas diez años después por Mainzer y Chua (2012), quienes explicitaron las reglas de Wolfram y las respectivas equivalencias en el lenguaje matemático no lineal de las funciones recursivas (especialmente, pp. 22 ss.). Así pues, prosigue Wolfram, es posible representar cualquier sistema en términos de las reglas simples de un autómata celular. Pero, si todos los autómatas son equivalentes al autómata universal, entonces este "debe ser efectivamente capaz de emular cualquier otro sistema, y como un resultado suyo, debe ser capaz de producir un comportamiento que es tan complejo como el comportamiento de cualquier otro sistema" (Wolfram 2002: 643). Esto le conduce a concluir dos puntos capitales de su obra: i) que existe un rasgo universal de todos los sistemas y es el estar basados en reglas simples (tal es lo que Wolfram entiende por computar); y ii) la formulación del "principio de equivalencia computacional" que enuncia que "todos los procesos, sean productos humanos o hechos espontáneos de la naturaleza, pueden ser vistos como computaciones" (Wolfram 2002: 715).

Todo el planteo de Wolfram se sostiene por la existencia de modelos computacionales y la "emulación" o equivalencia entre ellos. Exactamente como quienes aducen la tesis de Church-Turing, esto no permite inferir

no nos resulta satisfactoria por el hecho de que, la suya, es una indicación puramente formal. Como es harto sabido, las condiciones lógicas puras no juegan necesariamente un papel crucial en las decisiones ontológicas y epistemológicas, que aquí estamos indicando junto a la lógica argumental. Floridi, de hecho, no concibe tampoco la posibilidad, como hacemos en el siguiente párrafo, de que sea un razonamiento abductivo.

que los objetos modelizados computen en sí mismos, sino, cuanto más, hipotéticamente. Mainzer y Chua argumentan exactamente igual a Wolfram (2012: 107); Zenil (2012b), Dodig-Crnkovic (2010), Petrov (2003), y, por supuesto, también Cottam, Ranson y Vounckx (en Dodig-Crnkovic y Giovagnoli 2013).

En conclusión, resultan evidentes las limitaciones que se tienen para pasar desde la representación computacional hacia el objeto modelizado. Por este camino, solo se encuentra que computan los modelos, o se conjetura la capacidad computacional (empíricamente incomprobable). Debería hallarse, entonces, un camino teórico diferente para sostener la computación natural. Sin embargo, esto parece conducir a una contradicción. En efecto, ha de encontrarse una forma de mostrar que la cosa a ser representada posee la cualidad de computar, sin recurrir a una representación computacional. Pero si existiera una tal forma, entonces no podría ser otra que un procedimiento computacional. Y esto implica que procede mediante modelización computacional, lo que es contradictorio.

5. Una reversión del argumento ontológico y el planteo gnoseológico

El fundamento de la hipótesis computacional se puede ensayar mediante un argumento trascendental, según parece estar continuamente insinuado en los trabajos de los autores estudiados hasta aquí: una reversión del argumento ontológico. Entre las versiones de Anselmo de Canterbury, Descartes, Leibniz y Kant, una de las formulaciones de Descartes resulta ser la más adecuada a nuestro contexto. El filósofo escribe en su *Principia Philosophiae* (1905): "*Quo cuiusque ex nostris ideis objectiva perfectio major est, eo eius causam esse debere maiorem* [Cuanta mayor es la perfección objetiva de nuestras ideas, tanto más perfecta ha de ser su causa]" (I.XVII). Descartes explica esta aserción mediante la analogía con la idea de una máquina: si alguien tuviera la idea mental de una ingeniosa máquina, sea cual sea la entidad que causó su existencia en su mente (sea una máquina real observada, o sea el producto de un intelecto muy bien formado en los principios de la mecánica), esa entidad debe contener todas las cualidades que tiene la idea, pero con mayor eminencia (o en un grado formal igual). En base a esto, argumenta a favor de la existencia de Dios (en I.XVIII). La reversión de este argumento para la computación natural sería del siguiente modo: todas las "perfecciones" de los modelos computacionales deben encontrarse, igual o en mayor medida en aquello que es modelizado; la capacidad computacional es una "perfección" de los modelos, por lo tanto, lo modelizado debe poseerla también, en grado de formalidad o eminencia igual o mayor. Ahora bien, amén de la definición de términos como formal, eminencia o perfección, la diferencia crucial entre ambos argumentos radica en que, en la prueba de Descartes, Dios figura como causa eficiente de la idea, mientras que la reversión contemporánea no puede afirmar razonablemente que la computación natural sea la causa eficiente de la representación computacional, ya que, para que esta exista, necesariamente debe intervenir el ser humano. En efecto, entre los estudiosos del concepto de computabilidad de Turing, se ha remarcado frecuentemente que este pensaba tal concepto como aquello que cualquier individuo pudiera hacer con papel y lápiz (mostrando acuerdo en ello tanto Gödel como Wittgenstein). Sin embargo, se podría argüir que, más allá de este puntapié inicial, los investigadores lograron interpretar posteriormente los procesos naturales como efectuando computaciones que luego modelizaron (o emularon). Esta respuesta transporta el planteo ontológico al plano gnoseológico, pues: ¿cómo puede el sujeto justificar que el objeto posee en sí mismo una determinada propiedad, en este caso, la de computar?

Este cuestionamiento no es explícitamente realizado por la mayoría de los trabajos que, hasta este momento, hemos evaluado. No obstante, se puede prever la existencia de respuestas divergentes, para las cuales proponemos la siguiente esquematización, que corre en paralelo a la que realizó Floridi (2011), mejorando la que había realizado en un artículo previo (Floridi 2008). Partiendo de la concepción de que el fundamento de la realidad es matemática y que la computación es el procedimiento por la que se derivan (y por ello existen) todas sus tesis, entonces se adopta la postura gnoseológica del racionalismo computacional, bajo el cual se encuentran Chaitin (2007), Wolfram (2002), Mainzer y Chua (2012), Szudzik (2012), Deutsch (2012) y posiblemente Dodig-Crnkovic (2023). A esta rama gnoseológica, Floridi la llama empírico-matemática (2011: 320 ss.). Mientras que, partiendo de la asunción de procesos computacionales en sistemas reales (en exactamente el mismo sentido en que se afirma que ocurre un intercambio de energía en un proceso termodinámico), surge la postura gnoseológica del realismo computacional, bajo el cual se agrupan Zuse (2012), Fredkin (2012), Wu (2012), Wu y Wang (2023), Wu y Brenner (2017), Lloyd (2012), y posiblemente Dodig-Crnkovic. A esta, Floridi la denomina metafísica (2011: 320 ss.).

Pero es evidente que ninguna de estas perspectivas puede resultar satisfactoria respecto a la problemática planteada, ya que dan por supuesto aquello por lo que se exige una justificación. En especial, la intervención humana es la que no puede ser ignorada. Cualquiera de los ejemplos de computaciones referidos a lo largo de este trabajo, están constituidos por un lenguaje que codifica la información de ingreso (*input*) y un conjunto de reglas procedimentales que opera exclusivamente con ese lenguaje para ofrecer una salida (*output*). Como es esperable, existirá un conjunto diverso de lenguajes computacionales (de Castro Korgi 2004). Esto implica que cualquier cosa que se pretenda someter al cálculo computacional (desde las entidades matemáticas hasta los hechos fácticos) debe ser previa y necesariamente interpretada para que pueda amoldarse al formalismo de la computación. Resulta elocuente el ejemplo de la matematización de la teoría de la evolución por parte de Chaitin (2012), al cual se cuestionó precisamente la interpretación genetista de los principales sucesos biológicos, que es la que viabiliza finalmente la representación computacional de la evolución (Siedlinski 2016).

Todo esto nos indica que el procedimiento computacional precisa *con anterioridad* comprender los sucesos físicos en términos matemáticos *computables*. De no ser así, el procedimiento resulta completamente inaplicable. Como lo hiciera notar Toffoli, según recoge Floridi (2011: 322), hay un aspecto heurístico en todo el proceso de modelización, condición indispensable para la realización de cualquier computación. Pero siendo así, entonces ha de admitirse que el sujeto epistémico solo puede dar cuenta de su interpretación para realizar la representación computacional, sin que esto le permita superar el carácter hipotético de la misma.[7] Por lo tanto, ha de decirse lo mismo de la hipótesis computacional.

[7] Floridi (2011: 320 ss.) critica ambas posturas gnoseológicas por los siguientes argumentos: al racionalismo computacional (o empirismo-matemático) por confundir el uso predicativo con el atributivo (predicar de una representación que computa es distinto de atribuir la capacidad de computar a lo representado) y al realismo computacional (o metafísica) por asumir un compromiso ontológico injustificado. En cambio, arguye en favor de un realismo estructural (2011: 347), basado en la propuesta de los niveles de abstracción. Desde un punto de vista epistemológico, el nivelismo de Floridi es un método de interpretación para el conocimiento de la realidad (2011: 47), estructurado en un conjunto de categorías que definen niveles de abstracción, que satisfacen cierta condición relacional (2011: 55). Desde el punto de vista gnoseológico, es una versión contemporánea del esquematismo kantiano (2011: 58, 347), ya que el nivelismo justifica la construcción del conocimiento de la realidad de una manera no exhaustiva (2011: 331). Desde un punto de vista ontológico, sostiene que lo único que existe y es siempre interpretado por los sistemas de conocimiento humano, es la información (2011: 13 ss.). Por este motivo, no ha sido considerada su postura entre los trabajos estudiados aquí.

6. Conclusión

La posibilidad de generar modelos computacionales en distintos campos de investigación ha sugerido la concepción de la computación natural. Así se ha podido concebir al cerebro como análogo a una computadora (Anderson y Lebiere 2003), o a ciertos procesos metabólicos a nivel celular como realizando computaciones. También ha generado un entendimiento computacional de la homeostasis, transversal a ciertos artefactos y sistemas orgánicos. Resulta ingenuo contar estos ejemplos de modelización como evidencia a favor de aquel entendimiento. Toda evidencia contiene cierta interpretación por la cual se hace posible recolectarla bajo un tipo de fenómeno. De allí el requerimiento de encontrar un fundamento, intentado, como hemos expuesto, por varias vías. Sin embargo, hemos buscado demostrar que este fundamento es epistemológicamente innecesario, ontológicamente insostenible, y gnoseológicamente subjetivo. Es decir, esta interpretación general de las cosas no puede superar el carácter hipotético, siendo equivocado aseverar que la naturaleza o las cosas computan en sí mismas.

Por lo tanto, que los fenómenos puedan modelizarse, no significa que lo modelizado realice un cómputo en sí mismo. Lo correcto sería afirmar que se pueden comprender las cosas *como si* realizaran cómputos. Es una interpretación regida por las palabras iniciales con que Turing caracterizó la modelización matemática de los procesos embrionarios: "Este modelo vendría a ser una simplificación y una idealización, y consecuentemente una falsificación" (1952: 37; traducción propia). Negar su carácter hipotético o interpretativo, pues, conduce a la postura del idealismo racionalista de los primeros siglos modernos.

BIBLIOGRAFÍA

Anderson, J. R., y Lebiere, C. (2003), "The Newell Test for a theory of cognition". *Behavioral and Brain Sciences*, 26(5): 587-640.

Bauer, A. (2012), "Intuitionistic Mathematics and Realizability in the Physical World", en H. Zenil (2012a) (comp.), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation* (Londres: World Scientific Publishing, 143-158).

Beavers, A. F y Harrison, C. D. (2012), "Information-Theoretic Teleodynamics in Natural and Artificial Systems", en H. Zenil (2012a) (comp.), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation* (Londres: World Scientific Publishing, 347-364).

Billari, F. C., Fent, T., Prskawetz y A., Scheffran, J. (2006) (eds.), *Agent-Based Com-*

putational Modelling: Application in Demography, Social, Economic and Environmental Sciences (Berlín: Springer).

Blanco, J., García, P. y Cherini, R. (2011), "Convergencias y divergencias en la noción de computación", *Revista CTS*, 7(19): 111-121.

Bull, L., Holley, J., de Lacy Costello, B. y Adamatzky, A. (2013), "Towards Turing's A-Type Unorganised Machines in an Unconventional Substrate: A Dynamic Representation in Compartmentalised Excitable Chemical Media", en G. Dodig-Crnkovic y R. Giovagnoli (2013) (comps.), *Computing Nature: Turing Centenary Perspective* (Berlin: Springer, 185-200).

Chaitin, G. (2007), *Thinking about Gödel and Turing: Essays on Complexity, 1970-2007* (Londres: World Scientific Publishing).

Chaitin, G. (2012), *Proving Darwin: Making Biology Mathematical* (Nueva York: Pantheon).

Church, A. (1935), "An Unsolvable Problem of Elementary Number Theory", *American Journal of Mathematics*, 58(2): 345-363.

Colburn, T. y Shute, G. (2010), "Knowledge, Truth, and Values in Computer Science", en J. Vallverdú (2010) (comp.), *Thinking Machines and the Philosophy of Computer Science: Concepts and Principles* (Hershey: Informational Science Reference, 119-131).

Copeland, J. (2004), "The Church-Turing Thesis", *Neuroquantology,* 2: 101-115.

Cottam, R., Ranson, W. y Vounckx, R. (2013), "A Framework for Computing like Nature", en G. Dodig-Crnkovic y R. Giovagnoli (2013) (comps.), *Computing Nature: Turing Centenary Perspective* (Berlin: Springer, 23-60).

Davis, M. (1982), "Why Gödel Didn't Have Church Thesis?", *Information and Control*, 54: 3-24.

De Castro Korgi, R. (2004), *Teoría de la computación: Lenguajes, autómatas, gramáticas* (Bogotá D.C.: Unibiblos).

Descartes, R. (1905), *Oeuvres de Descartes: Principia Philosophiae* (Paris: Léopold Cerf).

Deutsch, D. (1999), *La estructura de la realidad* (Barcelona: Anagrama).

Deutsch, D. (2012), "What is Computation? (How) Does Nature Compute?", en H. Zenil (2012a) (comp.), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation* (Londres: World Scientific Publishing, 551-566).

Dodig-Crnkovic, G. (2010), "Biological Information and Natural Computation", en J. Vallverdú (2010) (comp.), *Thinking Machines and the Philosophy of Computer Science: Concepts and Principles* (Hershey: Informational Science Reference, 36-52)

Dodig-Crnkovic, G. (2023), "Computational Natural Philosophy: a Thread from Presocratics through Turing to ChatGPT", *Proceedings of Ninth International MBR Conference. Model-Based Reasoning, Abductive Cognition, Creativity*. Roma, Italia.

Dodig-Crnkovic, G. y Giovagnoli, R. (2013) (eds.), *Computing Nature: Turing Centenary Perspective* (Berlín: Springer).

Dodig-Crnkovic, G. y Burgin, M. (2019) (eds.), *Philosophy and Methodology of Information: the Study of Information in the Transdisciplinary Perspective* (Londres: World Scientific Publishing).

Durán, J. M. (2010), "Computer Simulations and Traditional Experimentation from a Material Point of View", en J. Vallverdú (2010) (comp.)n *Thinking Machines and the Philosophy of Computer Science: Concepts and Principles* (Hershey: Informational Science Reference, 280-293).

Ehrenfecht, A., Kleijn, J., Koutny, M y Rozenberg, G. (2012), "Reaction Systems: a Nature Computing Approach to the Functioning of Living Cells", en H. Zenil (2012a) (comp.), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation* (Londres: World Scientific Publishing, 189-208).

Einstein, A., Podolsky, B. y Rosen, N. (1935), "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete", *Physical Review*, 47(10): 777-780.

Feyerabend, P. (1975), *Tratado contra el método: esquema de una teoría anarquista del conocimiento* (Madrid: Tecnos).

Floridi, L. (2008), "Against Digital Ontology", *Synthese*, 168(1): 151-178.

Floridi, L. (2011), *The Philosophy of Information* (Nueva York: Oxford University Press).

Fredkin, E. (1990), "Digital Mechanics: an Informational Process Based on Reversible Universal CA", *Physica D: Nonlinear Phenomena,* 45: 136-156.

Fredkin, E. (2012), "Discrete Theoretical Processes (DTP)", en H. Zenil (2012a) (comp.), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation* (Londres: World Scientific Publishing, 365-380).

Klein, A. y Godunov, A. (2006), *Introductory Computational Physics* (Nueva York: Cambridge University Press).

Kuhn, T. (2010), *La estructura de las revoluciones científicas* (México D.F.: Fondo de Cultura Económica).

Lakatos, I. (1975), "La falsación y la metodología de los programas de investigación científica", en I. Lakatos y A. Musgrave (eds.), *La crítica y el desarrollo del conocimiento* (Barcelona: Grijalbo, 203-343).

Leibniz, G. W. (1981), *Discurso de Metafísica* (Madrid: Alianza).

Lesne, A. (2007), "The Discrete versus Continuous Controversy in Physics", *Mathematical Structure in Computer Science*, 17: 1-39.

Lloyd, S. (2012), "The Universe as Quantum Computer", en H. Zenil (2012a) (comp.), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation* (Londres: World Scientific Publishing, 567-582).

Mainzer, K. y Chua, L. (2012), *The Universe as Automaton: from Simplicity and Symmetry to Complexity* (Berlín: Springer).

Margenstern, M. (2012), "Bacteria, Turing Machines and Hyperbolic Cellular Automata", en H. Zenil (2012a) (comp.), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation* (Londres: World Scientific Publishing, 209-230).

Minsky, M. (1988), *La sociedad de la mente* (Buenos Aires: Galápago).

Murawski, R. (2004), "Church 's Thesis and its Epistemological Status", *Annales UMCS Informatics*, 2: 57-70.

Nicolaidis, M. (2010), "Computational Space, Time and Quantum Mechanics", en J. Vallverdú (2010) (comp.), *Thinking Machines and the Philosophy of Computer Science: Concepts and Principles* (Hershey: Informational Science Reference, 253-279).

Petrov, P. (2003), "Church-Turing Thesis is almost Equivalent to Zuse-Fredkin Thesis (an Argument in Support of Zuse-Fredkin Thesis)", *Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on System Theory and Scientific Computation, Special Session on Cellular Automata and Applications (ISTASC'03).*

Riofrío, W. (2010), "On Biological Computing, Information and Molecular Networks", en J. Vallverdú (2010) (comp.), *Thinking Machines and the Philosophy of Computer Science: Concepts and Principles* (Hershey: Informational Science Reference, 53-64).

Shapiro, J. (2005), "Effectiveness", en J. van Benthem, G. Heinzmann, M. Rebuschi y H. Visser (2005) (eds.), *The Age of Alternative Logics: Assesing Philosophy of Logic and Mathematics Today* (Dordrecht: Springer).

Shapiro, J. (2013), "Effectiveness", en J. Copeland, C. J. Posy y O. Shagrir (2013) (eds.), *Computability: Turing, Gödel, Church, and Beyond* (Londres: The MIT Press).

Siedlinski, R. (2016), "Turing Machines and Evolution: a Critique of Gregory Chaitin's Metabiology", *Studies in Logic Grammar and Rhetoric*, 48: 133-150.

Szudzik, M. P. (2012), "The Computable Universe Hypothesis", en H. Zenil (2012a) (comp.), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation* (Londres: World Scientific Publishing, 479-524).

Turing, A. M. (1950), "Computing Machinery and Intelligence", *Mind*, 59(236): 433-460.

Turing, A. M. (1952), "The Chemical Basis of Morphogenesis", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 237(641): 37-72.

Vallverdú, J. (2010) (ed.), *Thinking Machines and the Philosophy of Computer Science: Concepts and Principles* (Hershey: Informational Science Reference).

Von Neumann, J. (2012), *The Computer and the Brain* (Connecticut: Yale University Press).

Wiener, N. (1948), *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine* (Massachusetts: The MIT Press).

Wiener, N. (1988), *Cibernética y sociedad* (Buenos Aires: Sudamericana).

Wolfram, S. (2002), *A New Kind of Science* (Estados Unidos: Wolfram Media).

Wu, K. (2012), "The Essence, Classification and Quality of the Different Grades of Information", *Information*, 3: 403-419.

Wu, K. y Brenner, J. (2017), "Philosophy of Information: Revolution in Philosophy. Towards an Informational Metaphilosophy of Science", *Philosophies*, 2(22): 2-30.

Wu, K. y Wang, Z. (2023), "The Information Paradigm, Spanning All Levels of Human Knowledge", *Computer Science and Mathematics Forum*, 8(6): 1-6.

Zenil, H. (2012a), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation* (Londres: World Scientific Publishing).

Zenil, H. (2012b), "Introducing the Computable Universe", en H. Zenil (2012a) (comp.), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation* (Londres: World Scientific Publishing, 1-20).

Zuse, K. (2012). "Calculating Space (Rechnender Raum)", en H. Zenil (2012a) (comp.), *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation* (Londres: World Scientific Publishing, 729-786).

Recibido: 25-07-2024; aceptado: 30-04-2025