



ERWIN SCHRÖDINGER: FÍSICA, BIOLOGÍA Y LA EXPLICACIÓN DEL MECANISMO DE LA VIDA

Erwin Schrödinger: physics, biology, and the explanation of the mechanism of life

KARIM GHERAB-MARTÍN

Universidad Rey Juan Carlos, España

KEYWORDS

Erwin Schrödinger
What is life
Life
Molecular Biology
Quantum Mechanics
Physics
Entropy

ABSTRACT

This article presents the work What is life? of the Austrian physicist Erwin Schrödinger and carries out a critical analysis of his influence on the birth of Molecular Biology as a discipline. To do this, we will analyze its impact on the main actors before the discovery of DNA, but also some after. We will also break down the main concepts, some correct and others incorrect, used by Schrödinger.

PALABRAS CLAVE

Erwin Schrödinger
Qué es la vida
Biología Molecular
Vida
Mecánica cuántica
Física
Entropía

RESUMEN

Este artículo presenta la obra ¿Qué es la vida? del físico austriaco Erwin Schrödinger y realiza un análisis crítico acerca de su influencia en el nacimiento de la Biología Molecular como disciplina. Para ello, analizaremos su impacto en los actores principales anteriores al descubrimiento del ADN, pero también algunos posteriores. También desmenuzaremos los principales conceptos, unos correctos y otros incorrectos, utilizados por Schrödinger.

Recibido: 11/ 09 / 2023

Aceptado: 10/ 10 / 2023

1. Introducción.

Dublín, septiembre de 1944. Schrödinger firma el *prefacio* del libro más influyente en la biología del siglo XX, considerado por muchos como el inicio de la biología molecular y que marcaría (Dyson, 1999, p. 12) el destino de una parte importante de la biología hasta nuestros días. En su libro *¿Qué es la vida?* el físico austriaco busca una respuesta al misterio de los organismos vivos y es por ello por lo que, al tiempo que reconoce el buen hacer de la física y la química en lo que se refiere a la explicación y descripción de la materia inerte, también admite (Schrödinger, 1997, pp. 18-20) el fracaso de ambas disciplinas en el asunto de la materia viva. La conclusión es que se deben buscar nuevas leyes físicas que den cabida a los fenómenos vivientes porque las que hay son insuficientes. Muchas preguntas surgen con respecto a las relaciones posibles entre física y biología, pero podemos destacar la siguiente: ¿es factible explicar la vida reduciéndola a leyes específicas dentro del ámbito de la física? Schrödinger (1997, pp. 20, 59) piensa que sí es posible con la ayuda de la mecánica cuántica (1997, p. 124), pero con matices. El autor reflexiona sobre una posible nueva física que fuera capaz de dar cuenta de los procesos biológicos. Se trata de un nuevo intento por reducir las leyes de la biología a las leyes de la física.

En el presente artículo analizaremos las aportaciones de Schrödinger a la biología en el contexto de la época. También estudiaremos hasta qué punto fue influyente para el posterior descubrimiento del ADN. Una mayoría de autores han destacado la influencia del libro de Schrödinger en el desarrollo de la genética moderna, y de otras ramas de la biología, despertando el interés y reclutando a jóvenes y brillantes científicos de otros campos de la ciencia para la “causa” de la biología (Watson, 1994, p. 5; Crick, 1989, p. 28; Dyson, 1999, pp. 10, 12; Prigogine, 1998, pp. 33-34; Eigen, 1999, p. 18; Gould, 1999, pp. 41-42; Crow, 1992, p. 238; Kauffman, 1999, pp. 117-118; Judson, 1996, p. 109; Moore, 1996, pp. 362-363). Otros autores, sin embargo, han insistido que no fue tan decisivo (Pauling, 1987, p. 231; Perutz, 1990, pp. 291-293; Yoxen, 1979, pp. 29-30Z), recordando que ya antes de la publicación del libro existieron intentos dirigidos a plantear el problema de la genética desde la perspectiva de los átomos.

2. El alcance de la influencia de Schrödinger.

Schrödinger se basó en un artículo escrito en 1935 por Timoféeff-Ressovsky, Zimmer y Delbrück, en el que este último estimaba que, a partir del análisis de las mutaciones provocadas en las moscas de la fruta, el volumen de un gen era aproximadamente igual a mil átomos. De aquí tomó Schrödinger la idea de que existía “una clara posibilidad de que se produzca una mutación cuando tiene lugar una ionización a una distancia no mayor de 10 átomos de un punto concreto de un cromosoma” (citado por Perutz, 1990, p. 295). Según Perutz (1990, p. 295), mientras Schrödinger estaba escribiendo su libro, varias publicaciones habían demostrado que tales cálculos carecían de sentido. Max Perutz (1987, p. 293) ha añadido que las especulaciones de Schrödinger que no se basaron o no parafrasearon el artículo de Timoféeff, Zimmer y Delbrück resultaron ser equivocadas. Por su parte, Linus Pauling (1987, pp. 229-232) rechazó tajantemente la *neguentropía*: su crítica a Schrödinger, admitida por Moore (1987, p. 561) como correcta, es que Schrödinger tomó con demasiada literalidad la idea de absorción de “entropía negativa”¹ del medio circundante por parte del organismo vivo, esto es, absorbiendo nutrientes ordenados que disminuirían su entropía. De hecho, Pauling ha insistido en que Schrödinger en ningún momento definió el sistema a tratar y que el libro *¿Qué es la vida?* no ha influido en la biología:

En mi opinión no hizo contribución de ninguna clase, si acaso, y debido a su discusión acerca de la “entropía negativa” en relación con la vida, hizo una contribución negativa. [...] Cuando leí el libro por primera vez, hace unos cuarenta años, me decepcionó. (Pauling, 1987, pp. 228-229)

Probablemente, Schrödinger (1997, pp. 110-112) cometió el error de proponer la extracción de entropía negativa del entorno tras leer el siguiente extracto, que el físico Ludwig Boltzmann, también austriaco, escribió en 1886:

¹ Así la llamó también Brillouin (Jacob, 1999, p. 238).

La lucha generalizada de los seres animados por la existencia no es una lucha por las materias primas (que para los organismos son el aire, el agua y el suelo, todo ello disponible en abundancia) ni por la energía, que cualquier cuerpo contiene de sobra en forma de calor (no transformable, por desgracia), sino una lucha por la entropía, que se hace accesible a través de la transición de energía del Sol caliente a la Tierra fría. (Citado por Schneider & Kay, 1999, p. 228)

En cuanto a la crítica de Perutz (1987, p. 297; 1990, pp. 304, 306) a Schrödinger acerca de la entropía negativa y a sus consideraciones acerca de los cambios entrópicos que acaecen en el proceso de plegado de las proteínas, así como en los procesos de transcripción del ADN al ARN mensajero y de traducción del ARN en proteínas, parecen exageradas respecto al modesto apunte de Schrödinger. Además, como bien ha escrito Moore (1987, p. 561), todas éstas “consideraciones termodinámicas citadas por Perutz son irrelevantes para el argumento de *¿Qué es la vida?*”.

Sea como fuere, es cierto que Schrödinger no hizo experimentos, sino que su libro se basó principalmente en las aportaciones empíricas de Delbrück (Perutz, 1990, p. 293; Dyson, 1999, p. 14) y en los conceptos termodinámicos y estadísticos desarrollados por Boltzmann. Sin embargo, Dyson (1999, p. 12) ha precisado que “Schrödinger nunca declaró que sus ideas fueran originales, y la importancia de su libro radica en las preguntas que formuló y no en las respuestas que conjeturó”, muchas de las cuales resultaron ser correctas (Murphy & O’Neill, 1999, p. 11). Además, James Watson, Francis Crick y Maurice Wilkins, que recibieron el premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1962 por el descubrimiento de la estructura del ADN, han admitido (Judson, 1996, pp. 29, 77, 87-88, 251) la influencia del libro en sus vidas. Por ejemplo, Wilkins ha escrito que:

El libro de Schrödinger tuvo un efecto muy positivo en mí y, por primera vez, me interesé por problemas biológicos. (Citado en Moore, 1996, p. 362)

Y Watson también ha reconocido haber leído el libro de Schrödinger en 1946, en su etapa de estudiante en Chicago:

Desde el momento en que leí *¿Qué es la vida?* de Schrödinger concentré todos mis esfuerzos en encontrar los secretos del gen. (Citado en Moore, 1996, p. 362; también en Judson, 1996, p. 29)

En cuanto a Crick, la cosa está más confusa. Por un lado, Watson (1994, p. 5) ha afirmado que Crick abandonó la física en favor de la biología tras leer *¿Qué es la vida?* y el propio Crick escribió en 1965 que “el libro de Schrödinger fue muy oportuno y atrajo a gente que de otra forma no hubiese entrado en absoluto en la biología” (citado en Perutz, 1990, p. 291). Crick también admitió la influencia del libro en una entrevista concedida a Judson (1996, pp. 87-88) y en un comentario que hizo en 1971 que ha sido citado por Perutz:

No puedo recordar ninguna ocasión en la que Jim Watson y yo hayamos discutido las limitaciones del libro de Schrödinger. [...] Por lo tanto, nunca malgastamos el tiempo discutiendo si deberíamos pensar en la manera que lo hizo Schrödinger o en la de Pauling. Nos parecía obvio que debíamos seguir a Pauling. (Citado en Perutz, 1990, p. 291)

Al hilo de este comentario, Perutz ha declarado algo muy similar:

No puedo recordar a Crick, Watson, John Kendrew y a mí discutiendo la importancia del libro de Schrödinger en biología molecular estructural durante los años que pasamos juntos en el Laboratorio Cavendish. (Perutz, 1987, pp. 291-292)

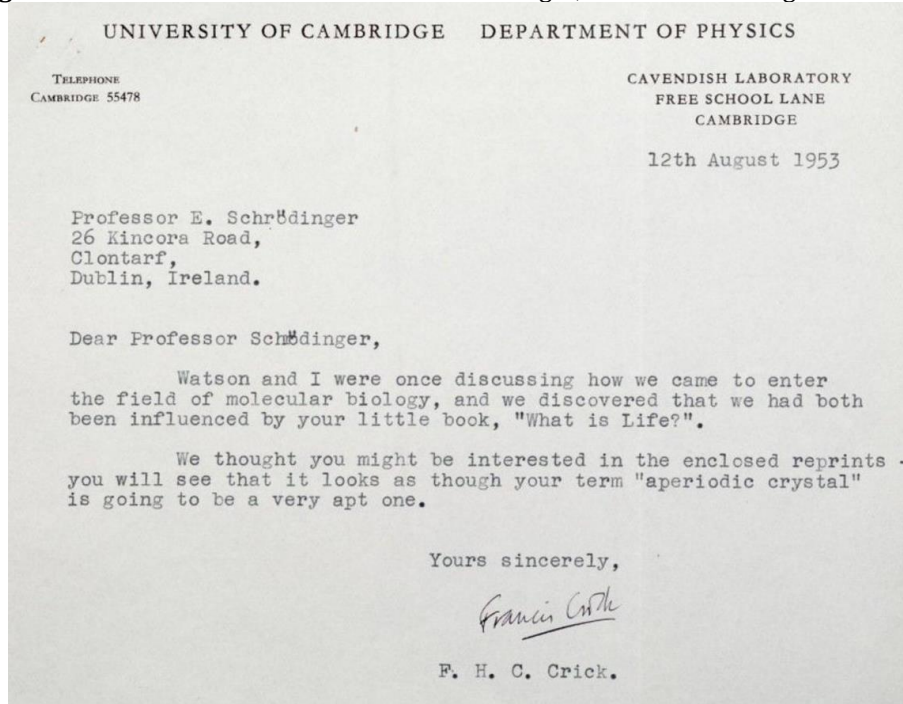
Pero de nuevo, en 1988, Crick escribió que había encontrado fascinante el libro de Schrödinger antes de dedicarse a la biología y que:

sólo más adelante logré ver sus limitaciones —como la mayoría de los físicos, su autor no sabía nada de química—, pero sin duda creaba la sensación de que cosas importantes estaban a la vuelta de la esquina. (Crick, 1989, p. 28).

De lo que no hay duda es de la importancia que Crick debió de dar al término “cristal aperiódico” que introdujo Schrödinger, pues no dudó en escribirle una carta (ver Fig. 1), con fecha 12 de agosto de

1953, anunciándole su influencia sobre Watson y él mismo y acerca de la conveniencia de dicho término a la luz del descubrimiento recién realizado.

Figura 1. Carta de Francis Crick a Erwin Schrödinger, con fecha 12 de agosto de 1953.



Stephen Jay Gould ha indicado que el físico austriaco se planteó el espinoso problema de la vida, motivado por el ambiente cultural que existía en Viena a principios del siglo XX. El programa filosófico del Círculo de Viena, conocido como *positivismo lógico*, apoyaba y fomentaba la unificación de las diversas ciencias.

[Schrödinger] había ganado un premio Nobel de Física (la ciencia 'focal' o 'de más alto nivel', hacia las que convergerían las demás en la visión fundamentalmente reduccionista del movimiento pro-unidad de la ciencia y del positivismo lógico en general). (Gould, 1999, p. 44)

Era pues completamente natural que Schrödinger enfocara el problema de la vida bajo una visión unificadora, reduccionista y basada en la física. No debemos olvidar que nació, creció y completó sus estudios superiores en Viena, inmerso en ese ambiente filosófico de amplia cultura, que su hija Ruth Braunizer ha descrito así:

La principal influencia fue el ambiente vienés entre el cambio de siglo y finales de los años veinte. [...] Hubo un rápido crecimiento de la brillantez y el talento intelectual en todos los campos. [...] Había una excelente escolarización que fomentaba las humanidades. [...] El resultado fue un grupo social relativamente grande de hombres y mujeres con una amplia cultura. [...] A mi padre le horrorizaba la especialización y siempre se empeñó en ser un generalista. Era la marca de su generación. (Braunizer, 1999, pp. 240-241)

3. ¿Qué es la vida?

Schrödinger tomó a Delbrück y Boltzmann como guías y basó su libro en dos ideas biológicas claves relacionadas con los trabajos de ambos autores: la naturaleza de la herencia y la termodinámica de los organismos vivos (Murphy & O'Neill, 1999, pp. 9-10). La primera idea, la que más trató, se refería al orden y a la estabilidad que manifestaban los genes, contrariamente a lo esperado —tendencia al desorden debido al aumento de entropía— para cualquier material compuesto de átomos. La segunda idea apuntaba a la forma en que un organismo vivo sería capaz de mantener el orden interno y eludir el aumento de entropía mediante intercambio energético con el exterior "comiendo, bebiendo, respirando, fotosintetizando, etcétera" (Schrödinger, 1997, p. 111), es decir, generando desorden en su

entorno para compensar la disminución de entropía —más orden— en su interior. La primera idea ocupó la mayor parte del libro, mientras que la segunda fue tratada al final y no de forma muy extensa. Dyson (1999, pp. 13-14) ha ofrecido una explicación convincente a este hecho.

- (1) El primer problema, que Schrödinger (1997, pp. 108, 124) llamó “orden a partir del orden”, trataba el asunto de la *replicación*, que podía explicarse a partir de la estabilidad ejercida por la mecánica cuántica sobre las estructuras moleculares; y, puesto que él había sido uno de los fundadores de la mecánica cuántica, “es natural que se interesara ante todo por las implicaciones biológicas de su propio invento” (Dyson, 1999, p. 14).
- (2) El segundo problema, que Schrödinger (1997, p. 124) llamó “orden a partir del desorden”, trataba el asunto del *metabolismo*, que era la capacidad de la célula viva para extraer energía negativa de su entorno según las leyes de la termodinámica (Schrödinger, 1997, 111-112).

Según Dyson, el artículo de Timoféeff-Ressovsky y Delbrück sólo aportaba pistas para afrontar el primer problema:

Los experimentos de Timoféeff-Ressovsky medían los efectos de los rayos X sobre la replicación y no pretendían observar los efectos sobre el metabolismo. [...] El nuevo sistema experimental de Delbrück, el bacteriófago, es una criatura puramente parásita y en la cual se ha perdido la función metabólica y solo sobrevive la función replicadora. [...] Era necesario encontrar una criatura sin metabolismo para aislar el fenómeno de la replicación de forma experimental. (Dyson, 1999)

Para analizar el asunto de la *replicación*, primero hay que explicar lo que era un ser vivo a ojos de Schrödinger: algo capaz de seguir teniendo movimiento, en el sentido de resistencia a la irreversible tendencia de la materia hacia el equilibrio termodinámico —estado de máxima entropía—. El organismo, en su esfuerzo por aferrarse a la vida, debe expulsar hacia afuera el aumento de entropía. Para ello, la Naturaleza habría logrado crear dentro del ser vivo una molécula aperiódica suficientemente estable como para resistir la corriente entrópica ascendente. El físico austriaco infirió que cada organismo debía pues encontrar la forma de extraer entropía negativa (Schrödinger, 1997, pp. 110-112) de su entorno como forma de paliar el aumento de entropía producido por él mismo en su lento camino hacia el equilibrio termodinámico, esto es, hacia el completo y mortal desorden molecular.

En lenguaje coloquial la entropía puede entenderse como la medida del grado de desorden² de un sistema, ya sea de un organismo vivo, de un objeto inerte, de un escritorio repleto de papeles o del Universo en su conjunto: a mayor desorden, mayor entropía. Concebida de esta manera, no es difícil imaginar la entropía tendiendo siempre a aumentar en el quehacer cotidiano: con el tiempo, los papeles de nuestro escritorio tienden a desordenarse; el destino de nuestras casas es el de acabar siendo auténticas pocilgas si no es por el esfuerzo diario que hacemos por limpiarlas y reordenarlas, especialmente en los instantes previos a recibir visitas. Mediante la comida, el ser vivo adquiere la energía necesaria para reordenar su estructura corporal, a la manera en que el/la “amo/a de casa” limpia y ordena su hogar cada mañana. Según Schrödinger, el aumento entrópico ha de ser derrotado si se quiere sobrevivir. En suma, el organismo lucha diariamente por producir orden a partir del desorden. Pero ¿de dónde proviene este desorden que consume nuestras vidas? Boltzmann mostró que el desorden tiene su origen en la termodinámica de los sistemas microscópicos y, más concretamente, en la aleatoriedad molecular propiciada por las fluctuaciones térmicas.

No caben dudas sobre el imponente atractivo de la mecánica estadística: hacer visible el orden allí donde predomina el desorden. Dicho de manera un poco más comprensible, la física estadística extrae leyes mecánicas a partir de la observación y medición de movimientos aleatorios de grandes números de partículas microscópicas y, promediando adecuadamente todas estas mediciones, muestra la regularidad buscada conforme a los fenómenos físicos observados. Gracias a ella podemos otorgar a estas regularidades el estatus de leyes evitando el azar resultante de las fluctuaciones térmicas. El comportamiento de una partícula no es concluyentemente válido para establecer leyes debido a la

² Esta era la manera simple de entenderlo hace un siglo. Hoy en día, la noción de entropía ha evolucionado mucho y no sería aceptable una explicación de este tipo en el ámbito científico y académico.

sensibilidad de su movimiento respecto del gradiente de temperatura: cada partícula individual vive en un constante “ir y venir” aleatorio gobernado por corrientes de temperatura en forma de fluctuaciones térmicas, de manera que éstas la “empujan” en todas direcciones, al azar, sin que pueda definirse un patrón en sus movimientos irregulares. Este hecho se debe al constante impacto sobre dicha partícula de moléculas con movimiento aleatorio —movimiento browniano— y, en último término, de las irremediables fluctuaciones cuánticas descritas por el *principio de indeterminación* descubierto por Werner Heisenberg. Sin embargo, al tomar como muestra un enorme número de átomos, somos capaces de hacer predicciones basándonos en la termodinámica, esto es, recurriendo a medidas en el ámbito macroscópico. En resumen, no conocemos el comportamiento individual de cada átomo por ser su movimiento aleatorio, pero sí podemos predecir el comportamiento global de un conjunto relativamente grande de átomos promediando para todas las medidas de éstos.

Al hilo de esta diferencia entre el comportamiento de un átomo, un electrón o un fotón y el comportamiento de un gas, Schrödinger (1997, pp. 21-23) ofreció una explicación de por qué los organismos vivos más evolucionados han adquirido el tamaño de un ratón o de un ser humano. Estos son aproximadamente los tamaños con los que dichos organismos pueden promediar —o mejor sería decir *sentir o percibir*— estadísticamente el impacto de miles de millones de átomos:

De no ser así, si fuéramos organismos tan sensibles que un solo átomo, o incluso unos pocos pudieran producir una impresión perceptible en nuestros sentidos, ¡cielos, cómo sería la vida! Por ejemplo: un organismo de este tipo con toda seguridad no sería capaz de desarrollar el tipo de pensamiento ordenado que, después de pasar por una larga serie de estados previos, finalmente desemboca en la formación, entre otras muchas, de la idea de átomo. (Schrödinger, 1997, pp. 23-24)

Hemos llegado a la conclusión de que un organismo, y todos los procesos biológicos importantes que experimente, deben tener una estructura marcadamente “multiatómica” y tienen que ser protegidos de los acontecimientos “monoatómicos” aleatorios que pudieran alcanzar una importancia excesiva. (Schrödinger, 1997, p. 39)

Como hemos visto, un conjunto suficientemente grande de átomos, ya se trate de un sólido, de un líquido o de un gas, permite fijar su comportamiento macroscópico mediante la suma estadística de los comportamientos individuales de los átomos que lo componen.

Sin embargo, al adentrarnos en el terreno de los organismos vivos, vemos que las cosas parecen funcionar de manera diferente. Tomando como caso el estudio de un gen, y basándose en las consideraciones de Timoféeff-Ressovsky, Zimmer y Delbrück antes mencionadas, Schrödinger estimaba que el volumen del gen debía ser lo suficientemente grande como para contener la mínima cantidad de átomos capaz de asegurar un comportamiento regular y ordenado, como lo requieren las teorías genéticas de la herencia (Schrödinger, 1997, pp. 52-53). En efecto, los rasgos del fenotipo se heredan de padres a hijos y parecen conservarse en el tiempo, a pesar del paso de múltiples generaciones, lo cual refuerza la impresión de extrema estabilidad en la estructura del gen —genotipo— que lleva consigo el código cifrado de la herencia. La regularidad de la repetición de dicho rasgo, de generación en generación, y el orden mostrado en la transmisión del *secreto* de la vida, con la rara excepción de las mutaciones, invitaban a pensar en una estructura cristalina (Schrödinger, 1997, p. 19) altamente compleja, ordenada y estable, capaz de permanecer inalterada —salvo mutaciones— durante siglos. Para Schrödinger, la biofísica tenía ante sí un problema muy diferente a lo relatado antes para los gases o los líquidos: en el caso del gen, el orden macroscópico no podía convivir con el desorden microscópico. En el caso de los organismos biológicos, el orden en el nivel macroscópico debía provenir, según el físico austriaco, de un orden en el nivel microscópico. O, dicho de otra manera, el orden y la permanencia del fenotipo han de provenir del orden y la permanencia del genotipo.

En este orden de cosas, Schrödinger se permitió lanzar hipótesis altamente sugestivas, muchas de las cuales estimularon la imaginación de jóvenes físicos que veían la oportunidad de hacer una gran contribución a la biología. Su primera hipótesis asumía (Schrödinger, 1997, p. 79) que la estructura del gen era la de una molécula con fuertes enlaces químicos, de acuerdo con la teoría cuántica del enlace molecular desarrollada por W. Heitler y F. London en 1926-1927. Estos fuertes y extremadamente estables enlaces contrarrestarían el escaso número de átomos presentes en el gen, insuficientes para asegurar la regularidad y el orden estadístico ya mencionados. Así pues, el enlace químico molecular explicaría la estabilidad observada en los genes de manera que un cromosoma se confirmaría como

una gigantesca molécula extraordinariamente estable (Schrödinger, 1997, pp.78-79). Como indican Pauling (1987, p. 231-132), Perutz (1987, p. 239) y Watson (1994, p. 81), Jordan ya había sugerido en 1940 que “existía una interacción estabilizante mecanocuántica, que operaba preferencialmente entre moléculas idénticas o casi idénticas, y que era importante en procesos biológicos tales como la reproducción de genes” (Perutz, 1990, p. 297), si bien sufrió el revés de la contestación por parte de Pauling y Delbrück de que “las interacciones entre moléculas se comprendían en ese momento bastante bien y daban estabilidad a dos moléculas de estructura *complementaria* en yuxtaposición, en lugar de a dos moléculas con estructuras necesariamente *idénticas*” (Perutz, 1990, p. 297). Según el propio Perutz (1987, p. 239), este comentario suyo era fruto de una sugerencia anterior de Haldane, en 1937, acerca de una complementariedad esteroespecífica análoga entre un anticuerpo y su antígeno (Pauling, 1987, p. 232). Prosiguiendo sus investigaciones, Jordan se mostró en 1945 extremadamente ambiguo en sus descripciones de los genes y tan pronto hablaba de una cadena molecular doblada sobre sí misma como de una superposición de espirales, pero merece la pena exponer un pasaje en el cual parece presagiar la estructura de doble hélice posteriormente descubierta:

[...] los cromosomas perceptibles al microscopio en el instante de la división del núcleo no están estirados a lo largo, sino que están enroscados en espirales (eventualmente incluso en doble espiral). (Jordan, 1959, p. 113)

Dentro de este esquema, ¿cómo encajaba el fenómeno de las mutaciones? Schrödinger (1997, p. 84) respondió recurriendo a la mecánica cuántica: *ceteris paribus* respecto al número y tipo de átomos que la constituyen, una molécula podía tener (Schrödinger, 1997, pp. 85-86) varias configuraciones geométricas distintas —isómeros— que podían corresponder a varios niveles de energía; y puesto que el paso de una configuración a otra debía necesariamente discreto, entonces los niveles energéticos permitidos a la molécula también eran —obligadamente— discretos. Entre estos niveles de energía posibles, podía haber unos más estables que otros, siendo el nivel de energía más bajo el más estable, de modo que podía inferirse que, para saltar de un nivel estable a otro —es decir, pasar de una configuración geométrica a otra—, la molécula requería de un suministro adicional de energía con el que superar un determinado umbral de energía potencial. Una mutación correspondía entonces a un salto cuántico en los niveles energéticos como consecuencia de un aporte inusualmente alto de energía que, a su vez, provocaría un cambio en la molécula, ya fuera una variación en la distribución espacial de los átomos o bien la sustitución de uno o varios átomos por otros diferentes. Schrödinger (1997, pp. 67-73) basó sus consideraciones, por un lado, en los experimentos realizados en 1900 —de forma independiente— por De Vries en Amsterdam, por Correns en Berlín y por Tschermak en Viena, que identificaron las discontinuidades genéticas de la herencia —o sea, las mutaciones—, y, por otro lado, en los experimentos de Timoféeff en 1934 sobre los efectos de los rayos X en relación con el grado de mutabilidad de los genes.

Como se ha dicho, Schrödinger se percató que la macromolécula —o cristal— que constituye el cromosoma no podía actuar movida por el azar producido por las fluctuaciones térmicas puesto que, en tal caso, los átomos que conformaban dicha molécula —o cristal— estarían sometidos a la entropía, lo cual haría imposible que la información genética pudiera ser transmitida de padres a hijos sin alteraciones. Sin embargo, decía Schrödinger, esto no es lo que ocurre. Es un hecho de la vida que la información genética es transmitida sin cambios apreciables a través de los siglos, sin excesivas pérdidas en la información transportada, a excepción de algunas mutaciones y de las mezclas debidas al cruce de los genes provenientes del padre y de la madre. La conclusión del sabio austriaco era que el orden y la estabilidad de los cromosomas debían ser los garantes de la inalterable permanencia de la información en el tiempo:

La vida parece ser el comportamiento ordenado y reglamentado de la materia, que no está asentado exclusivamente en su tendencia de pasar del orden al desorden, sino basado en parte en un orden existente que es mantenido. (Schrödinger, 1997, p. 108)

Schrödinger se refería al poder de los organismos vivos de evadir el progresivo desorden debido al aumento de entropía y recalca su extrema estabilidad, como también lo hacía Heisenberg (1971, pp. 123-125), que pensaba que dicha estabilidad no podría reducirse únicamente a componentes físicos y químicos, si acaso como casos “límite”. Schrödinger señaló a la mecánica cuántica como la responsable

de la estabilidad molecular —de los cromosomas—, es decir, de la fuerte sujeción que ejercen las fuerzas interatómicas en el enlace químico.

De todo lo anterior, el austriaco dedujo que el orden mostrado por los organismos vivos en el proceso de replicación no podía provenir del desorden —un desorden producido por las fluctuaciones térmicas—, sino del orden —un orden expresado como estabilidad molecular—. Refiriéndose a la concepción física de un orden macroscópico originado por un orden microscópico subyacente, Schrödinger lo expresaba de la manera siguiente:

El físico y el químico, al investigar la materia inanimada, nunca han presenciado fenómenos que hubieran tenido que interpretar de esta manera. Por consiguiente, nuestra teoría no explica los hechos vitales de nuestra preciosa teoría estadística, de la que estuvimos justamente orgullosos porque nos permitía echar una mirada detrás del telón para contemplar el magnífico orden de las leyes físicas exactas procedente del desorden atómico y molecular. (Schrödinger, 1997, p. 123)

4. La biología molecular después de Schrödinger. Eigen y Monod.

En esta sección, analizaremos algunas de las interesantes concepciones nacidas con posterioridad al libro de Schrödinger. En 1970, el biólogo francés y premio Nobel de Medicina —en 1965— Jacques Monod retomó algunas de estas ideas en su libro *El azar y la necesidad*, si bien desde una perspectiva algo diferente. Para referirse a la estabilidad y permanencia del genotipo, Monod hablaba de *invariancia*. En efecto, también él recalca la extraña paradoja que rodea a los organismos vivos y su no-obediencia al segundo principio de la termodinámica, y señalaba que dichos organismos, lejos de desordenarse, mantenían su estructura invariable (Monod, 2000, p. 27). Es muy posible que el término “invariancia” expresara mejor que ningún otro la fidelidad en el proceso de replicación hereditaria, es decir, la resistencia de la molécula de ADN a cualquier cambio o alteración física concebible. Y era precisamente esta invariancia la que daba aún más valor a la caprichosa y necesaria labor del azar en la adaptación de la especie al entorno por la vía de las mutaciones. Así, Eigen trazó una analogía con la moderna teoría de la información:

Desde mediados de este siglo disponemos de una teoría que lleva por nombre “teoría de la información”. Sin embargo, su fundador, Claude Shannon, subrayó de buen principio que, más que de la información en sí, la teoría trata de la comunicación de información. La información como tal no se toma en consideración, sino que se supone dada [...]. (Eigen, 1999, p. 25)

Si no existiera esa propensión a la invariancia, esa “fuerza” opuesta a las corrientes entrópicas de la materia, el efecto de las mutaciones sobre la estructura del ADN se traduciría en excesivos cambios sin posibilidad alguna de conseguir lo que Monod (2000, p. 19) llamaba “performances” tangibles: la continua aleatoriedad de dichos cambios haría de la evolución un “sin sentido”. La adaptación al entorno sería entonces literalmente imposible ante la continua, rápida y caótica alteración de la molécula de ADN (Eigen, 1999, p. 25): como resultado de las continuas mutaciones e inestabilidad del ADN, el metabolismo del organismo vivo jamás se adaptaría de manera estable al entorno; al revés, cada repentina mutación favorable sería tan fugaz y el tiempo de adaptación y de armonía con dicho entorno sería tan breve, que no daría la menor oportunidad a la estabilidad.

Por otro lado, una invariancia carente de mutaciones aleatorias —esto es, completamente determinista— tampoco permitiría la deseable adaptación de la especie al medio circundante. En tal caso, la expulsión del azar del proceso hereditario evitaría el aprovechamiento de una mutación favorable. Y sin poder adaptarse al medio circundante, cualquier organismo, por complejo que fuera, moriría sin remedio pasado un tiempo. Inspirándose en la *teleología* de Aristóteles, Monod introdujo el concepto de *teleonomía*, que sería algo así como el camino evolutivo que optimiza el funcionamiento de los organismos vivos y que los conduce —desde la consideración ideal— a la perfección. Se trataría de un refinamiento de las estructuras vitales para adaptarse, cada vez con mayor éxito, a la Naturaleza:

[...] que la invariancia precede necesariamente a la teleonomía. O para ser más explícito, la idea darwiniana de que la aparición, la evolución, el refinamiento progresivo de estructuras cada vez más intensamente teleonómicas, es debido a perturbaciones sobrevenidas a una estructura *que poseía ya la propiedad de invariancia*, capaz por consiguiente de “conservar el azar” y por ello de someter los efectos al juego de la selección natural. (Monod, 2000, p. 33)

Eigen resumía estas ideas cuando, al aludir al contenido del fenotipo y su estrecha relación con la dinámica de la selección natural, escribía:

Para que este contenido sea susceptible de optimización evolutiva, debe reproducirse con una tasa de error finita. Tenemos aquí un umbral de error, por debajo del cual la evolución es óptima, pero por encima del cual la información cae en picado víctima de una catástrofe de error, vaporizándose como en una transición de fase material. (Eigen, 1999, p. 25)

Visto así, el azar dejaba de ser un lastre en la construcción de los organismos vivos para convertirse en su motor. Por analogía, la invariancia representaba el ancla al que se agarra la vida. La pluma de Henri Bergson (1907, p. 246), antes que ellos, supo expresar bellamente esta tensión entre la vida y la materia: “la vida [es] un esfuerzo por subir la pendiente que la materia desciende”. Monod ponía el acento en la capacidad de la invariancia —estabilidad molecular— para conservar el azar —las mutaciones—. El azar, según Monod, ya no sería ese desorden al que nos referimos antes al hablar de las moléculas que conforman la materia inerte —gases, líquidos o sólidos— y a partir de la cual se desarrolló la mecánica estadística. El azar se ha convertido en una necesidad; una dosis adecuada de azar, que lejos ya de significar desorden, se ha convertido en fuente de orden y de vida:

Azar captado, conservado, reproducido por la maquinaria de la invariancia y así convertido en orden, regla, necesidad. (Monod, 2000, p. 103)

Monod insistía en que el único medio de modificar el texto cifrado encapsulado en el gen era el acontecimiento accidental y ocasional de las mutaciones; un azar que “está en el origen de toda novedad, de toda creación en la biosfera” (Monod, 2000, p. 118). Él mismo confesó la influencia de las nociones de “élan vital” y de “evolution créatrice” de Bergson en su pensamiento (Monod, 2000, pp. 121-122), que expresó como un *impulso vital* —que nacería de forma espontánea e impredecible— acompañando y realimentando una *evolución creadora* de vida sin propósitos concretos ni finalidades, tan solo como una antorcha que ilumina al ser vivo cuya vida se sostiene en esa estructura material estable —la molécula de ADN—, pero que bulle y se agita al calor de la llama del azar.

Las ideas expresadas por Schrödinger respecto de la herencia y de los procesos evolutivos, llevadas hasta sus últimas consecuencias por Monod, mostraban con claridad la diferencia que había entre ambos tipos de materia: por un lado, la materia inerte; y, por el otro, la *materia viva*. La materia viviente era pues, para ellos, un tipo de materia que hacía un uso eficiente de los recursos que la Naturaleza ponía a su disposición y aprovechaba algún tipo de *ley física* —quizás, aún desconocida— que le permitía generar el *impulso vital* al que se refería Bergson, contrarrestando la entropía predicha por la termodinámica. Las misteriosas propiedades que habría de tener esa *ley física* convertían en apremiante, según Schrödinger (1997, p. 18), la tarea de cubrir las carencias de “la Física y de la Química [actuales para] dar cuenta de los fenómenos espaciotemporales que tienen lugar dentro de los límites espaciales de un organismo vivo”. No era intención de Schrödinger fomentar el desaliento entre los físicos y los químicos; más bien expresaba su firme convicción de que la ciencia debía aventurarse a recorrer caminos ignotos si de verdad se quería comprender el mecanismo de la vida:

Por lo tanto, no debe desanimarnos que tengamos dificultad en interpretar la vida por medio de las leyes ordinarias de la Física. Eso es lo que cabía esperar de lo que hemos aprendido sobre la estructura de la materia viva. Debemos estar preparados para encontrar un nuevo tipo de ley física que la gobierne. [...] No, no creo que tengamos que llamarla ley no-física. Porque el nuevo principio subyacente es genuinamente físico. En mi opinión, no es otra cosa que el mismo principio de la teoría cuántica. (Schrödinger, 1997, p. 124)

5. Del cristal aperiódico de Schrödinger a Dyson, De Duve y Prigogine.

Y en este punto nos llega una de las aportaciones más sobresalientes de Schrödinger: nos sugiere que los cromosomas, y en general la estructura de la materia viva, son cristales aperiódicos, esto es, que la distribución espacial de las moléculas básicas que los constituyen no se repite de forma periódica, proclamando sin vacilaciones que el cristal aperiódico “es el portador material de la vida” (Schrödinger, 1997, p. 20). La suposición de un cromosoma con estructura molecular aperiódica es coherente con la posibilidad de que los genes que lo componen contengan el código cifrado de la

herencia: un cristal periódico no puede contener información en cantidad suficiente. El encapsulamiento molecular de la información hereditaria resulta extraordinariamente más efectivo bajo una configuración aperiódica, de lo cual puede sugerirse que el orden sin igual mostrado en el proceso de diseminación de los genes en el sentido de su capacidad de transmitir el genotipo inalterado a lo largo de grandes períodos generacionales se debe a su composición aperiódica. Resulta entonces que un cristal aperiódico es un sistema que escapa al desorden molecular originado por las fluctuaciones térmicas y es, en su propia esencia, un sistema ordenado del cual emerge el orden que da sople a la vida.

La asombrosa propiedad de un organismo de concentrar una “corriente de orden” sobre sí mismo, escapando de la descomposición en el caos atómico y “absorbiendo orden” de un ambiente apropiado parece estar conectada con la presencia de “sólidos aperiódicos”, las moléculas cromosómicas, las cuales representan, sin ninguna duda, el grado más elevado de asociación atómica que conocemos —mucho mayor que el cristal periódico común— en virtud del papel individual que cada átomo y cada radical desempeñan en ellas. (Schrödinger, 1997, p. 120)

Este esfuerzo de buscar las bases físicas del “orden por el orden” predicho por Schrödinger lo culminaron Watson y Crick en 1953 con el descubrimiento de la estructura del ADN sin encontrar nuevas leyes de la física, sino aplicando las ya existentes gracias a la mecánica cuántica; pero a día de hoy aún falta por culminar el segundo esfuerzo: el del “orden por el desorden” o, en palabras de Prigogine (1997, p. 34), “el orden [que] se genera a partir del caos *a través de condiciones de no equilibrio*”, y aquí sí parece entreverse una nueva física (Scott Kelso & Haken, 1999, p. 214): la física de los sistemas complejos que, en efecto, se encuentran alejados del equilibrio termodinámico.

Prigogine ha admitido el profundo impacto que le produjo *¿Qué es la vida?* puesto que le “hizo intuir en 1945 que los fenómenos irreversibles podían ser el origen de la organización biológica” (Prigogine, 1998, p. 34). Asimismo, ha estudiado los procesos de *autoorganización* (Prigogine, 1997, p. 25) que se producen en los sistemas termodinámicos que se encuentran alejados del punto de equilibrio partiendo de ciertos ejemplos empíricos de “estructuras disipativas” (Prigogine, 1997, p. 316). Prigogine (1997, p. 86) ha afirmado que “en termodinámica del equilibrio, el determinismo es sólo estadístico; las condiciones en los límites sólo permiten describir el sistema promedio, y éste en realidad *fluctúa* constantemente y de forma incontrolable en torno a estos valores medios”. La inestabilidad provoca innumerables fluctuaciones, algunas de las cuales tienen éxito si alcanzan un valor crítico representado por la aparición de bifurcaciones y logran crecer alimentándose del entorno si se trata de sistemas abiertos (Scott Kelso & Haken, 1999, p. 191) e, incluso, de sistemas cerrados. Estos sistemas disipativos logran mantenerse lejos del equilibrio gracias a los “procesos disipativos que continuamente producen entropía” (Prigogine, 1997, pp. 88-89) dentro de circuitos de retroalimentación —*feedback*—. Los sistemas aislados, por el contrario, se ven abocados al equilibrio termodinámico, si bien pueden acoger inestabilidades locales que remiten con el tiempo. Los ejemplos de estructuras disipativas mencionadas muestran (Prigogine, 1997, p. 160) una coherencia o correlación entre las moléculas o iones aparentemente independientes que conforman el sistema o que toman parte en las reacciones químicas que se ve asimismo reflejada en otras disciplinas: la agregación de amebas acrasiales —*Dictyostelium discoideum*— al alcanzarse un valor crítico en la concentración de gradiente de AMP cíclico cuando el medio empobrece en nutrientes (Prigogine, 1997, pp. 192-194), la construcción de arcos como bases estructurales de los termiteros en el caso de las colonias de termitas (Prigogine, 1997, pp. 195, 255), la aparición de un “árbol de rutas” en la búsqueda de alimento en el caso de las hormigas motivado por el establecimiento de un umbral en la cantidad de feromonas producidas por el trasiego de todos los individuos (Prigogine, 1997, pp. 253-254), la construcción de arcos por parte de termitas trabajadoras *Macrotermes bellicosus* (Hofstadter, 1992, p. 399), el tráfico de una ciudad (Parrondo, 2003; Prigogine, 1997, p. 223), los comportamientos socioeconómicos (Schneider & Kay, 1999, p. 234; Prigogine, 1997, p. 154), etc.

Prigogine (1997, pp. 316-318) ha identificado el metabolismo con el funcionamiento de las estructuras disipativas puesto que “el funcionamiento de los sistemas biológicos parece cumplir las condiciones necesarias para que aparezcan las estructuras disipativas”, puesto que metaboliza intercambiando energía y materia con el entorno, como lo haría cualquier sistema abierto. En este

punto hay que recordar que, basándose en las consideraciones de Schrödinger, Eigen ha definido la vida en términos de tres características esenciales:

- (a) Autorreproducción, sin la cual la información se perdería tras cada generación.
- (b) Mutación, sin la cual la información sería “inmutable” y por lo tanto ni siquiera se originaría.
- (c) Metabolismo, sin el cual el sistema caería hacia el equilibrio, desde el que no es posible cambio ulterior alguno —como ya señaló correctamente Erwin Schrödinger en 1944—.

(Eigen, 1999, pp. 21-22)

A pesar de las críticas de Dyson (1999, pp. 14-15) que lo acusa de haberse centrado extremadamente en las teorías sobre el origen de la replicación, dejando en segundo plano los procesos metabólicos, acusación que también recae sobre las universidades estadounidenses. Dyson toma el término ‘metabolismo’ en su acepción alemana, *stoffwechsel*, traducible al castellano por “cambios en sustancias” y, por tanto, como la capacidad que tiene un organismo de alimentarse, desarrollarse, crecer, intercambiando materia y energía con el exterior (Prigogine, 1997, p. 255), independientemente de que pueda replicarse o no. Es decir, Dyson propone dos tipos de vida: la de los organismos que pueden replicarse, pero no pueden metabolizar y la de los organismos que pueden metabolizar, pero no replicarse. Para ello, se basa en la analogía que introdujo von Neumann en 1948, quien

utilizando los ordenadores como metáfora [...] observó que el metabolismo y la replicación, a pesar de sus intrincadas conexiones en el mundo biológico tal como existe en la actualidad, pueden separarse de manera lógica. Es posible desde un punto de vista lógico encontrar organismos que estén compuestos sólo de hardware, y que sean capaces de metabolizar, pero incapaces de replicarse. También es posible hallar organismos que estén compuestos solo de software, y que sean capaces de replicarse, pero incapaces de metabolizar. (Dyson, 1999, pp. 16-17).

De este modo, como también menciona Judson (1996, p. 250), el papel del software lo jugarían los ácidos nucleicos y el del hardware las proteínas. Siguiendo la analogía, el software es capaz de replicar sus programas, pero es incapaz de “conectarse” o “proyectarse” al exterior intercambiando energía sin la decisiva ayuda del hardware. Así, el software es un parásito del hardware, utiliza sus propiedades físicas para replicarse y extenderse en su seno, lo cual recuerda el comportamiento de los actuales virus informáticos al propagarse por las redes de cableado físico que interconectan PCs de todo el mundo o gracias a soportes magnéticos, ya sea en diskettes o en CDs. Por otro lado, Dyson afirma

Un autómatas compuesto de un hardware sin software puede existir y mantener su propio metabolismo. Puede vivir de manera independiente siempre que encuentre comida para consumir o números que devorar. (Dyson, 1999, p. 16)

Esto mismo es expresado, aunque de otra manera, por Maynard Smith y Szathmáry:

Los ácidos nucleicos llevan información genética que es transmitida por replicación. Las proteínas determinan el fenotipo del organismo. Ácidos nucleicos y proteínas están conectados a través del código genético, mediante el cual la secuencia de bases de un ácido nucleico se traduce en la secuencia de aminoácidos de una proteína. Este proceso de traducción da significado a los ácidos nucleicos: éstos especifican proteínas que influyen en sus propias posibilidades de supervivencia (su “adaptación”). (Maynard Smith y Szathmáry, 1999, p. 98)

y también por De Duve:

Supongamos una mutación conducente a la formación de un enzima que cataliza la conversión de A en B. Obviamente, dicho enzima no serviría de nada si A no estuviera ya presente. Por otro lado, tampoco serviría de mucho si no hubiera una demanda de B. Extendiendo este razonamiento a cada nuevo enzima que apareciera como resultado de alguna mutación y fuese retenido por la selección natural, llegamos a la conclusión de que muchos de los sustratos y productos de estos enzimas tienen que haber preexistido en el mundo de ARN. (De Duve, 1999, p. 112)

Desde esta perspectiva, la biología molecular habría dado un gran salto adelante en la comprensión del “software” de los organismos vivos autorreproductores con los descubrimientos de los últimos

cincuenta años del siglo XX, pero faltaría por acometer el mismo esfuerzo para comprender el origen de los procesos metabólicos, y es aquí donde algunos *gurús* de la física de la complejidad, como por ejemplo Kauffman (1999), Scott Kelso y Haken (1999, pp. 189-190) o Schneider y Kay (1999, pp. 221-223), y otros, proponen la emergencia de un “orden por fluctuaciones” que, sin embargo, De Duve (1999, p. 112) rechaza categóricamente:

Pero el problema más fundamental es sin duda el estudiado por Eigen, relativo a la evolución de poblaciones moleculares de interés biológico y la formación espontánea de un “código genético” por una sucesión de inestabilidades. (Prigogine, 1997, p. 322)

Schneider y Kay resumen perfectamente lo que pretenden:

la segunda ley de la termodinámica no es un impedimento para la comprensión de la vida, sino que es necesaria para una descripción completa de los procesos vivos. [...] [L]a segunda ley potencia los procesos de autoorganización y determina la dirección de muchos de los procesos observados en el desarrollo de los sistemas vivos. (Schneider & Kay, 1999, pp. 222-223)

Y es el caso que, con los progresos logrados en los últimos tiempos con estos métodos, se han atrevido a atacar (Scott Kelso & Haken, 1999, p. 207) el problema del cerebro como sistema fuera del equilibrio y sujeto, por consiguiente, a la dinámica autoorganizativa. El propio Prigogine señala que:

en condiciones alejadas del equilibrio, la materia adquiere nuevas propiedades, tales como “comunicación”, “percepción” y “memoria”, propiedades que hasta ahora sólo se atribuían a los sistemas vivos. (Prigogine, 1997, p. 212)

El hecho de que la explicación del “orden a partir del orden”, esto es, el descubrimiento de la estructura del ADN junto con sus procesos de replicación y la síntesis de proteínas no mostrara una nueva física, sino que confirmara la potencia de la mecánica cuántica, reforzó la visión mecanicista de los organismos vivos como máquinas mostrando como factible la existencia de estos como autómatas dotados de un hardware — proteínas— que ejecuta lo que el software —ADN— dispone. En relación con esto, cabe mencionar la analogía existente actualmente entre una mente y un PC que recuerda a la analogía que proponía Schrödinger (1997, p. 96) entre un cristal aperiódico y un gen —vida—. Es conveniente pues ver a continuación el modo en que muchos de los físicos que desembarcaron en la biología llegaron al paradigma mecánico de la vida.

6. Consideraciones finales.

Durante la primera mitad del siglo XX y hasta el famoso descubrimiento, en 1953, de la estructura molecular tridimensional del ADN por parte de James Watson y Francis Crick, las proteínas eran concebidas tradicionalmente como las portadoras del código genético. Muchos esfuerzos se dedicaron a la resolución de la secuencia de aminoácidos para las distintas proteínas existentes (Chandarevian, 1997), no en vano estaban consideradas como las componentes fundamentales de la vida: entender su funcionamiento así como su estructura y secuencia molecular se convirtieron en el equivalente a explicar el porqué de las *leyes de Mendel*: puesto que cualquier metabolismo necesita proteínas para su supervivencia, éstas se convirtieron en los portadores ideales de los *factores* anunciados por Gregor Mendel.

Antes de especular Schrödinger (1997, pp. 19, 42, 96) con la estructura aperiódica del gen o — como él mismo dudaba por aquel entonces— de la fibra cromosómica como portadora de algún tipo de clave o texto cifrado, los estudios de Sanger, sugeridos por Chibnall, en la secuenciación de los aminoácidos de la insulina y el éxito de sus procedimientos técnicos para la secuenciación de otras proteínas provocaron (Chandarevian, 1997, p. 17) un creciente interés en las proteínas como portadoras de la información genética. Y así, las proteínas, bajo la sospecha de ser las portadoras del código genético, se pusieron en el punto de mira de los bioquímicos de las grandes potencias con el fin de dilucidar sus secuencias, a pesar de que el estudio bioquímico de las proteínas había empezado ya en la década de 1920, cuando muchos de los científicos estadounidenses, británicos y franceses más prestigiosos que se dedicaron a este tema, pensaban que la bioquímica podía aclarar las funciones y los mecanismos de las proteínas. De entre estos investigadores, los más jóvenes optaron por ir más allá y comenzaron a estudiar las proteínas mismas a un nivel molecular como consecuencia, en un gran

número de casos, de la influencia ejercida por el libro *¿Qué es la vida?* de Schrödinger, que argumentaba la necesidad de bajar al nivel molecular para explicar tanto el mecanismo responsable de la herencia genética como el de las mutaciones, pero antes de Schrödinger había científicos apoyando tales ideas con el propósito de aplicar las leyes de la química y la física a la genética, de manera que ésta quedaría reducida a la química y, en última instancia, a la física (Yoxen, 1979, pp. 29-30; Pauling, 1987, p. 231; Perutz, 1990, p. 293). Pero ¿qué otros factores motivaron la relación de la genética con la química y la física, además del libro de Schrödinger? Por una parte, como han indicado Olby (1974, p. 29) y Kohler (1976), los programas financiados por la Fundación Rockefeller; y, por otra parte, como ha señalado Rasmussen (1997), un movimiento social de repulsa contra el lanzamiento de la bomba atómica sobre Hiroshima y Nagasaki en la Segunda Guerra Mundial.

Ya desde finales de la década de 1920, durante la Gran Depresión (Abir-Am, 1997), un ideal *mecanicista y reduccionista* se estaba imponiendo dentro de la comunidad científica:

[...] mecanicistas como Jacques Loeb, en el Instituto Rockefeller de Nueva York, también creían muy fervientemente que todas las propiedades intencionadas, sistemáticas y autónomas de los organismos vivos podían ser entendidas analíticamente en términos físico-químicos. Al final de los años 20, a pesar de la influencia de Loeb en la creación de una tradición reduccionista en el Instituto Rockefeller, la cual tuvo su efecto en los trabajos tempranos en biología molecular, algunos biólogos eran escépticos en cuanto a la validez de una tan drástica simplificación.

No obstante, la biología molecular fue construida en la creencia de que la naturaleza de la organización biológica era tal que un suficientemente sofisticado análisis reduccionista de algunos tipos de relaciones organizativas podía tener éxito. (Yoxen, 1982, pp. 129-130)

De la misma manera en que Descartes describió un mundo mecánico movido por continuos choques entre cuerpos materiales, un cosmos funcionando como un gigantesco reloj basado en engranajes, el siglo XX nació buscando desentrañar el misterio de la *vida* mediante la reducción del funcionamiento del metabolismo a un conjunto de mecanismos basado en la interacción entre genes. Los genes eran para el organismo lo que los engranajes para el reloj. El propio Schrödinger comparó el metabolismo de un organismo al mecanismo de un reloj:

creo que unas pocas palabras más bastan para explicar el punto de semejanza entre un mecanismo de relojería y un organismo. Se parecen sencilla y únicamente porque la base de este último también es un sólido, el cristal aperiódico que forma la sustancia hereditaria, el cual está protegido del desorden que proviene del movimiento térmico. [...] Pero no se me acuse de llamar a las fibras cromosómicas los “dientes de rueda de la máquina orgánica”, al menos no sin hacer referencia a las profundas teorías físicas en las que se basa el símil. [...] El “diente” aislado no es el resultado del burdo trabajo humano, sino la más fina y precisa obra conseguida por la mecánica cuántica del Señor. (Schrödinger, 1997, p. 130)

Vemos que, para Schrödinger, la física cuántica jugaba un papel fundamental a nivel genético. El secreto de la vida debía buscarse en la mecánica cuántica. Después de Schrödinger proliferaron los científicos que concebían la vida como una suma de genes que, secuenciados de una determinada manera, daban al metabolismo de cada organismo las características que le fueran propias. No obstante, es preciso señalar que esta idea ya existía desde antes:

Esta concepción de la vida apareció en la década de 1920, y otorgó al gen un papel principal en los procesos biológicos y un papel principal a los estudios acerca de la estructura del gen en las ciencias de la vida. (Yoxen, 1982, p. 130)

Terminamos con una sugerente cita de extracto de Schrödinger, donde el físico austriaco imaginaba el mecanismo subyacente al desarrollo de la vida como una estructura basada en relaciones causales, al estilo de lo que hoy en día llamaríamos *programa o software*:

Al decir que la estructura de las fibras de los cromosomas son un texto cifrado queremos significar que la “inteligencia absoluta”, imaginada por Laplace, para la que cualquier relación causal sería evidente, podría averiguar, partiendo de sus estructuras, si de un huevo, bajo determinadas condiciones, se desarrollaría un gallo negro o una gallina moteada, una mosca o una planta de maíz, un rododendro, un escarabajo, un ratón, o una mujer. (Schrödinger, 1997, p. 42)

Referencias

- Abir-Am, P. G. (1997). De la colaboración multidisciplinar a la objetividad transnacional: el espacio internacional, constitutivo de la biología molecular, 1930-1970. *Arbor*, 156(614), 111-150. <https://doi.org/10.3989/arbor.1997.i614.1857>.
- Alonso, M. (2022). Tecnologías cerebro-afectantes, identidad personal y autenticidad. *Bajo Palabra*, 30, 83-96, <https://doi.org/10.15366/bp2022.30.004>.
- Bergson, H. (1907). *L'évolution créatrice*. Alcan
- Braunizer, R. (1999). Reminiscencias. En M. P. Murphy & L. A. J. O'Neill (Eds.), *La biología del futuro. ¿Qué es la vida? cincuenta años después* (pp. 239-244). Tusquets, Barcelona.
- Chandarevian, S. (1997). Secuencias, conformación, información: bioquímicos y biólogos moleculares de los años 50. *Arbor*, 156(614), 15-44, <https://doi.org/10.3989/arbor.1997.i614.1854>.
- Crick, F. (1989). *Qué loco propósito: una visión personal del descubrimiento científico*. Tusquets, Barcelona.
- Crick, F. (2000). *La búsqueda científica del alma: una revolucionaria hipótesis para el siglo XXI*. Debate, Madrid.
- Crow, J. F. (1992). Erwin Schrödinger and the hornless cattle problem. *Genetics*, 130(2), 237-239, <https://doi.org/10.1093/genetics/130.2.237>.
- De Duve, C. (1999). ¿ARN sin proteína o proteína sin ARN? En M. P. Murphy & L. A. J. O'Neill (Eds.), *La biología del futuro. ¿Qué es la vida? cincuenta años después* (pp. 111-115). Tusquets, Barcelona.
- Dyson, F. J. (1999). *Los orígenes de la vida*. Cambridge University Press.
- Eigen, M. (1999). ¿Qué quedará de la biología del siglo XX? En M. P. Murphy & L. A. J. O'Neill (Eds.), *La biología del futuro. ¿Qué es la vida? cincuenta años después* (pp. 15-40). Tusquets, Barcelona.
- Fernández-Mateo, J. (2023). Realidad artificial: Un análisis de las potenciales amenazas de la Inteligencia Artificial. *VISUAL REVIEW. International Visual Culture Review / Revista Internacional de Cultura Visual*, 9(2), 335-347. <https://doi.org/10.37467/revvisual.v9.5004>.
- Fernández-Mateo, J. (2023). Philosophical & bioethical boundaries in current biotechnologies: human enhancement and welfare biology. *TECHNO REVIEW. International Technology, Science and Society Review / Revista Internacional de Tecnología, Ciencia y Sociedad*, 13(1), 103-114, <https://doi.org/10.37467/revtechno.v13.5120>.
- Gherab-Martín, K. (2022). Visualización de los objetos cuánticos en la interpretación de Copenhague: Una aproximación histórico-filosófica. *VISUAL REVIEW. International Visual Culture Review / Revista Internacional de Cultura Visual*, 9(2), 371-395, <https://doi.org/10.37467/revvisual.v9.5116>.
- Gould, S. J. (1996). Tres facetas de la evolución. En J. Brockman & K. Matson (eds.), *Así son las cosas: de los orígenes al cosmos; de la evolución a la mente; del pasado al futuro* (pp. 97-102). Debate, Madrid.
- Gould, S. J. (1997). *La falsa medida del hombre*. Grijalbo Mondadori, Barcelona.
- Gould, S. J. (1999). '¿Qué es la vida?' como problema histórico. En M. P. Murphy & L. A. J. O'Neill (Eds.), *La biología del futuro. ¿Qué es la vida? cincuenta años después* (pp. 41-61). Tusquets, Barcelona.
- Heisenberg, W. (1971). *Physique et philosophie: la science moderne en révolution*. Albin Michel, Paris.
- Hofstadter, D. R. (1992). *Gödel, Escher, Bach: un eterno y grácil bucle*. Tusquets, Barcelona.
- Jacob, F. (1999). *La lógica de lo viviente: una historia de la herencia*. Tusquets, Barcelona.
- Jordan, P. (1959). *La physique et le secret de la vie organique*. Albin Michel, Paris.
- Judson, H. F. (1996). *The eighth day of creation: makers of the revolution in biology*. Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York.
- Kauffman, S. A. (1999). '¿Qué es la vida?': ¿tenía razón Schrödinger? En M. P. Murphy & L. A. J. O'Neill (Eds.), *La biología del futuro. ¿Qué es la vida? cincuenta años después* (pp. 117-159). Tusquets, Barcelona.
- Kilmister, C. W. (Ed.) (1987). *Schrödinger: centenary celebration of a polymath*. Cambridge University Press.
- Kohler, R. E. (1976). The management of science: the experience of Warren Weaver and the Rockefeller Foundation program in molecular biology. *Minerva*, 14(3), 279-306, <https://doi.org/10.1007/bf01096274>.

- Maynard Smith, J. & Szathmáry, E. (1999). Lenguaje y vida. En M. P. Murphy & L. A. J. O'Neill (Eds.), *La biología del futuro. ¿Qué es la vida? cincuenta años después* (pp. 97-110). Tusquets, Barcelona.
- Moore, W. (1987). Schrödinger's entropy and living organisms. *Nature*, 327, 561, <https://doi.org/10.1038/327561a0>.
- Moore, W. (1996). *Erwin Schrödinger: una vida*. Cambridge University Press.
- Nogueroles Jové, M. (2022). Humberto Maturana. Ciencia, educación y democracia desde la biología del amor. *Bajo Palabra*, 30, 139-154, <https://doi.org/10.15366/bp2022.30.007>.
- Olby, R. (1974). *The path to the double helix*. MacMillan, Cambridge.
- Parrondo, J. M. R. (2003). Flujos y redes: la ciudad y la ciencia de los sistemas complejos. En J. L. González Quirós (Ed.), *Ciudades posibles* (pp. 105-126). Ediciones Lengua de Trapo, Madrid.
- Pauling, L. (1987). Schrödinger's contribution to chemistry and biology. En C. W. Kilmister (Ed.), *Schrödinger: centenary celebration of a polymath* (pp. 225-233). Cambridge University Press.
- Perutz, M. F. (1987). Erwin Schrödinger's 'What is life?' and molecular biology. En C. W. Kilmister (Ed.), *Schrödinger: centenary celebration of a polymath* (pp. 234-251). Cambridge University Press.
- Perutz, M. F. (1990). *¿Es necesaria la ciencia?* Espasa-Calpe, Madrid.
- Prigogine, I. (1997). *¿Tan sólo una ilusión? Una exploración del caos al orden*. Tusquets, Barcelona.
- Prigogine, I. (1998). *El nacimiento del tiempo*. Tusquets, Barcelona.
- Rasmussen, N. (1997). The mid-century biophysics bubble: Hiroshima and the biological revolution in America. *History of Science*, 35(3), 245-293, <https://doi.org/10.1177/007327539703500301>.
- Schrödinger, E. (1997). *¿Qué es la vida?* Tusquets, Barcelona.
- Scott Kelso, J. A. & Haken, H. (1999). Nuevas leyes esperables en el organismo: sinérgica del cerebro y el comportamiento. En M. P. Murphy & L. A. J. O'Neill (Eds.), *La biología del futuro. ¿Qué es la vida? cincuenta años después* (pp. 189-220). Tusquets, Barcelona.
- Yoxen, E. J. (1979). Where does Schrödinger's 'What is life?' belong in the history of molecular biology. *History of Science*, 17(1), 17-52, <https://doi.org/10.1177/00732753790170010>.
- Yoxen, E. J. (1982). *Giving life a new meaning: the rise of the molecular biology establishment. Scientific establishments and hierarchies*. Kluwer, Dordrecht.
- Sánchez Aguirre, F. de M. & Depaz Toledo, S. Z. (2023). Una mirada al pensamiento mágico de Giordano Bruno. *HUMAN REVIEW. International Humanities Review / Revista Internacional de Humanidades*, 18(5), 1-8, <https://doi.org/10.37467/revhuman.v18.4902>.
- Schneider, E. D. & Kay, J. J. (1999). Orden a partir del desorden: la termodinámica de la complejidad en biología. En M. P. Murphy & L. A. J. O'Neill (Eds.), *La biología del futuro. ¿Qué es la vida? cincuenta años después* (pp. 221-238). Tusquets, Barcelona.
- Murphy, M. P. & O'Neill, L. A. J. (Eds.) (1999). *La biología del futuro. ¿Qué es la vida? cincuenta años después*. Tusquets, Barcelona.
- Watson, J. (1994). *La doble hélice: un relato autobiográfico sobre el descubrimiento del ADN*. Salvat, Barcelona.