

## ¿Qué es la vida?

### Recordando el libro de Erwin Schrödinger, 60 años después

Jorge Alberto Castro  
jacastro@octopus.furg.br  
Departamento de Ciências Fisiológicas  
Fundação Universidade Federal do Rio Grande  
Rio Grande – RS - Brasil

#### **El origen del libro**

Erwin Schrödinger, el físico austríaco creador de la representación ondulatoria de la materia, publicó en 1944 su libro “¿Qué es la vida?”<sup>(1)</sup>, compilación de una serie de conferencias que había pronunciado en el Instituto de Estudios Avanzados de Dublin, el año anterior, ante un público numeroso. Escribió en el Prefacio del libro:

Se espera que un científico tenga conocimiento completo y profundo, de primera mano, de algunos temas y, por esto mismo, que no escriba sobre cualquier tópico en el cual no sea experto. Esto es considerado algo así como *noblesse oblige*. Para el presente propósito, pido permiso para renunciar a la *noblesse*, si alguna hay, y ser dispensado de la resultante obligación. Mi disculpa es la siguiente:

Heredamos de nuestros antepasados un profundo deseo de conocimiento unificado y comprensivo. La denominación aplicada a las más altas instituciones de enseñanza nos recuerda que, desde la antigüedad y a través de muchos siglos, el carácter *universal* ha sido el único al cual se otorga total crédito. Pero el crecimiento, en los singulares últimos cien años, de las múltiples ramificaciones del saber, tanto en extensión como en profundidad, nos confrontó con un difícil dilema. Sentimos claramente que sólo ahora comenzamos a disponer de material confiable para reunir lo conocido en una totalidad. Pero, por otro lado, se volvió casi imposible, para una única mente, dominar por completo más que una pequeña porción especializada de ese conocimiento.

No veo otra salida para este dilema (bajo riesgo de perder nuestro objetivo para siempre) que aventurarnos a embarcar, algunos de nosotros, en una síntesis de hechos y teorías, aunque dotados de un conocimiento incompleto y de segunda mano sobre algunos de ellos, y, peor aun, pudiendo parecer tontos.

Schrödinger reveló su interés por las relaciones entre diversas áreas del conocimiento en conferencias y libros de temática amplia, que equivocadamente alguien podría considerar de divulgación.

Ya en 1933, Schrödinger había pronunciado una conferencia intitulada “¿Por qué son los átomos tan pequeños?”, ante la Academia Prusiana de Ciencias<sup>(2)</sup>, pocos meses antes de recibir el Premio Nobel de Física, compartido con Paul Dirac. Volvió sobre esta pregunta como punto de partida para el desarrollo del libro que estamos considerando. Veamos la respuesta y sus consecuencias.

### **¿Por qué son los átomos tan pequeños?**

Schrödinger responde transformando previamente la pregunta en otra equivalente. Destaca que los átomos aparecen como pequeños porque quien formula la pregunta, está constituido por gran cantidad de ellos. Entonces, ¿por qué son necesarios tantos átomos para componer un organismo vivo?

Los procesos físicos y químicos básicos para el funcionamiento de un organismo requieren la participación de grandes cantidades de átomos para realizarse de modo seguro y previsible. Así, una estructura constituida por pocos átomos no podría ser asiento de procesos biológicos elementales, como la locomoción en un sentido determinado, porque la agitación térmica introduciría importantes perturbaciones o como el propio pensamiento que crea el concepto de átomo y trabaja con él.

Para ilustrar esta idea de modo elemental, digamos que un recinto de volumen  $V$  contiene  $N$  moléculas de gas. Seleccionemos un pequeño volumen  $v$ , dentro del recinto. La agitación térmica hace variar la cantidad de moléculas en el volumen  $v$ . La probabilidad  $P(x)$  de encontrar  $x$  moléculas en el volumen  $v$  en una observación aleatoria está dada por una distribución binomial:

$$P(x) = C_x^N \left(\frac{v}{V}\right)^x \left(1 - \frac{v}{V}\right)^{N-x}.$$

La cantidad esperada (media) de moléculas en el volumen  $v$  es

$$\bar{x} = N \frac{v}{V}$$

y el desvío estándar de la distribución es

$$\sigma = \sqrt{N \frac{v}{V} \left(1 - \frac{v}{V}\right)}.$$

De modo que se verifica la “ley de la raíz cuadrada de  $N$ ”, referida por Schrödinger:

$$\frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{v}{V} \left(1 - \frac{v}{V}\right)}$$

Es decir: la expresión de la cantidad esperada de moléculas en el volumen  $v$  es más precisa o confiable cuanto mayor la cantidad total  $N$  de moléculas que componen el sistema al cual esta expresión se aplica.

**La respuesta a la pregunta inicial genera una nueva pregunta: el orden**

En seguida, Schrödinger nota que un organismo vivo se mantiene sorprendentemente ordenado, a pesar de que la agitación térmica y otros comportamientos estadísticos con ella relacionados tienden a desordenar cualquier estructura constituida por muchas partículas. Así, llegamos a una segunda pregunta: ¿cómo puede ser creado y mantenido el orden (o la ordenación) de un ser vivo? Se trata de entender cómo, por ejemplo, una célula huevo, ya bastante ordenada y compleja, puede generar un ser pluricelular, aun más ordenado y complejo.

Schrödinger respondió esta pregunta distinguiendo dos maneras de producirse orden, ambas de interés biológico, que denominó “orden a partir del desorden” y “orden partir del orden”.

## **Orden a partir del desorden**

El organismo recibe orden desde su ambiente. Se ordena a expensas de una pérdida de orden en el ambiente. El concepto de orden aquí referido es el mismo invocado para explicar el concepto de entropía en Termodinámica Estadística, disciplina sobre la cual, en el mismo año de 1944, Schrödinger dictó un ciclo de conferencias, publicadas como un interesante pequeño libro<sup>(3)</sup>.

No cabe dudar de que la frase “orden a partir del desorden”, señala algo real e importante, hoy sólidamente incorporado al conocimiento biológico básico. Pero, después de tanto tiempo, persiste el desafío de encontrar los ejemplos explicativos que la idea merece, saliendo del terreno de las metáforas y utilizando el formalismo físico-matemático. El principal obstáculo para lograr este propósito parece haber sido la dificultad para crear una buena definición de “orden”. Presentamos como Apéndice, una sugerencia para desarrollos más avanzados sobre este punto.

## **Orden a partir del orden**

No toda la ordenación de un organismo vivo exige que su ambiente se desordene. Existe un orden transmitido genéticamente. Los conceptos de gene y mutación ya eran corrientes en 1944. Sin embargo, nada se sabía sobre la estructura o la naturaleza de las moléculas involucradas. El mismo año, Avery, McLeod y McCarthy estaban identificando el ADN como molécula depositaria de la información genética. La estructura del ADN fue revelada diez años más tarde, por Watson y Crick, permitiendo entender la codificación de la información genética.

Schrödinger se pregunta cómo puede un gen permanecer inalterado durante siglos, pasando de una generación a la siguiente, sin ser perturbado por la agitación térmica. Elabora, entonces, un modelo de la estructura molecular del gen, que explica su durabilidad e su permanencia. En 1935,

el físico alemán Max Delbrück, quien después se dedicó a la Biología, ya había notado que grandes moléculas formadas por uniones covalentes estaban dotadas de suficiente estabilidad como para almacenar información genética. Se trataba de una aplicación de la Física Cuántica, recién desarrollada. Las grandes moléculas biológicas conocidas en aquella época poseían periodicidad espacial, manifestada por su capacidad de cristalizar. Sin embargo, anota Schrödinger, una molécula con periodicidad espacial no sería capaz de contener suficiente información porque, cuando determinada una pequeña parte de ella, queda establecida la disposición de los átomos en toda ella. Entonces, propone un “cristal aperiódico”, en el cual la información quedaría almacenada como en un trecho escrito en código Morse. Este “cristal aperiódico” imaginado en 1944, es lo que hoy llamamos un ácido nucleico.

### **¿Se basa la vida en leyes físicas?**

El capítulo final de “¿Qué es la vida?” enfoca este punto, terminando la secuencia iniciada por la pregunta “¿por qué son los átomos tan pequeños?”

El pensamiento de Schrödinger se desarrolló bajo la influencia del “movimiento por la unidad de la ciencia”, una de las principales orientaciones de la escuela filosófica vienense, en la década de 1920, que defendía que la comunidad de leyes, métodos y lenguajes para todas las ciencias, viendo la Física como la “ciencia modelo”. Debía ser grande la tentación de afirmar que los seres vivos son conjuntos de partículas inteligibles mediante conceptos físicos generales.

La respuesta de Schrödinger es más elaborada, aunque sin contradecir esta abordaje. Opina que la vida es un proceso diferente y único que, algún día, será explicado por leyes físicas, pero no necesariamente por las actuales:

[...] un ingeniero, familiarizado solamente con máquinas de vapor, estará preparado, después de examinar la construcción de un motor eléctrico, para descubrir que éste funciona basado en principios que él todavía no entiende. Él ve el cobre, que le es familiar por su uso en calderas, usado aquí bajo forma de largos hilos enrollados formando bobinas; el hierro, que le es familiar en palancas, barras y cilindros de máquinas de vapor, usado aquí para ocupar el interior de esas bobinas de alambre. Quedará convencido de que se trata del mismo cobre y el mismo hierro, sujetos a las mismas leyes de la Naturaleza y, en esto, tendrá razón. La diferencia en la construcción es suficiente para que estos materiales funcionen de manera diferente. Este ingeniero no pensará que el motor eléctrico funciona dirigido por un fantasma, sólo porque comienza a girar cuando se acciona un interruptor, sin precisar una hornalla o vapor.

Se puede entrever que la Biología será útil a la Física, provocando el descubrimiento de nuevas leyes y, también, la Física a la Biología, porque ofrecerá una explicación unificada de la vida.

Pero no solamente el pensamiento evoluciona. En una conferencia transmitida por el Servicio Europeo de la BBC, en 1950<sup>(1)</sup>, Schrödinger invitó a tener en cuenta la posible evolución del propio órgano pensante:

Me parece inverosímil que nuestra comprensión del mundo represente una etapa definitiva o final, un máximo o un óptimo desde cualquier punto de vista. Con esto, no estoy queriendo decir simplemente que la continuación de nuestra investigación en las diversas ciencias, nuestros estudios filosóficos e intentos religiosos vayan a perfeccionar y mejorar nuestra presente perspectiva. No hay ningún motivo para creer que nuestro cerebro sea el supremo *nec plus ultra* de un órgano de pensamiento en el cual se refleja el mundo. Sería más razonable pensar que una especie pueda adquirir un dispositivo semejante que guarde con el nuestro la misma relación que el nuestro guarda con el de un perro o el de este animal con el de una babosa.

## **Epílogo**

En la primera mitad del siglo XX, partiendo de una pregunta aparentemente ingenua, Schrödinger propuso ideas que inspiraron a

numerosos pensadores e impulsaron la reflexión sobre las relaciones entre Física y Biología.

Es expresivo el hecho de que científicos de renombre, representantes de una amplia variedad de ramas del saber, se reunieran en 1993 para celebrar el quincuagésimo aniversario de “¿Qué es la vida?”, en el Trinity College de Dublin (Schrödinger pronunció sus conferencias en 1933 y el libro fue publicado en 1944). Las contribuciones a este congreso fueron reunidas en otro libro <sup>(4)</sup>.

#### REFERENCIAS

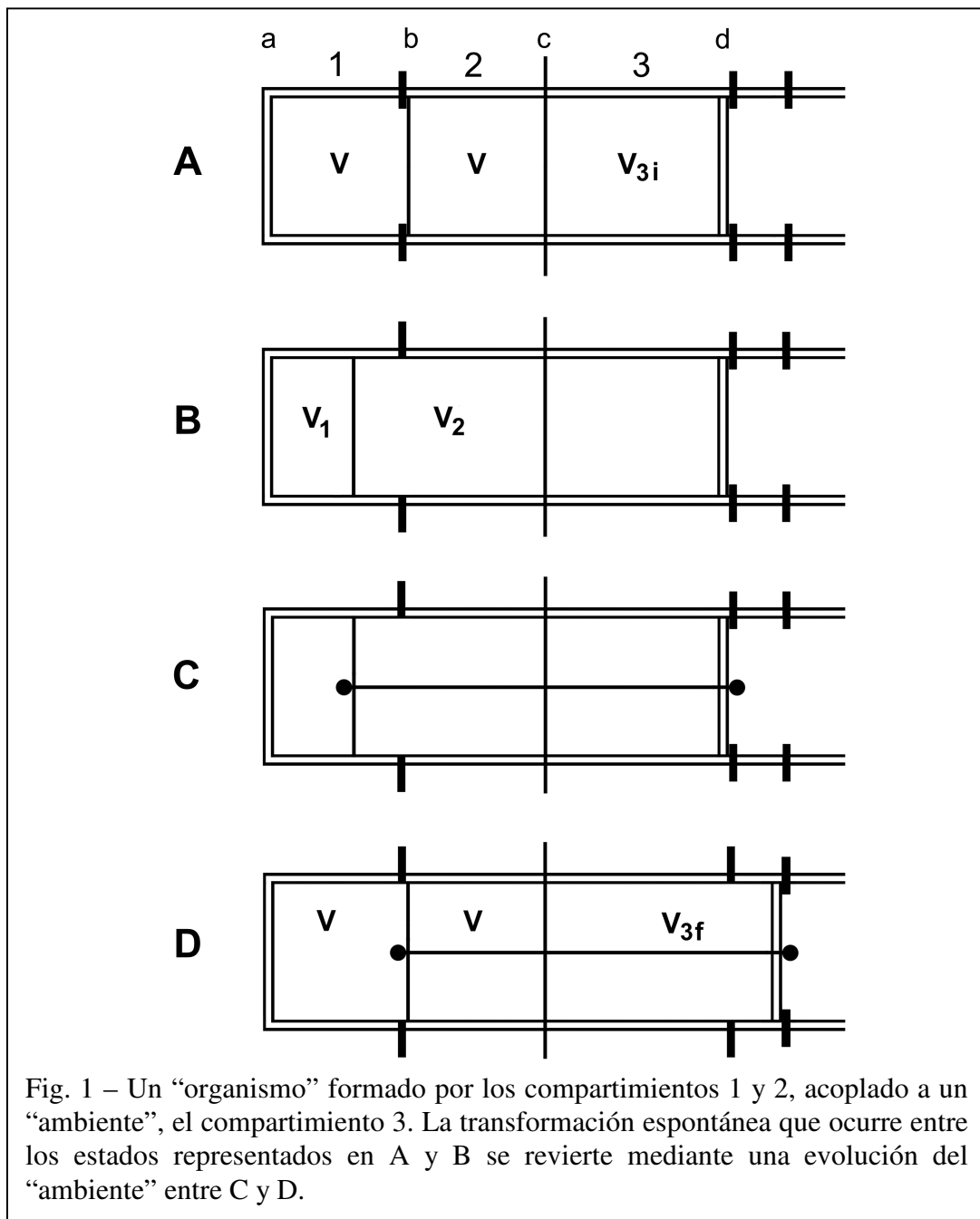
1. Schrödinger, E. What is Life? With Mind and Matter with Autobiographical Sketches. Cambridge, Cambridge University Press, 1992.
2. Schrödinger, E. Warum sind die Atome so Klein? Forschungen und Fortschritte, 9:125-126, 1933. Trad. español 2001 ¿Por qué son tan pequeños los átomos? In: Arana, J. Schrödinger. La nueva mecánica ondulatoria y otros escritos. Madrid, Biblioteca Nueva, 2001.
3. Schrödinger, E. Statistical thermodynamics. 2<sup>a</sup>. ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1952.
4. Murphy, M. M.; O'Neill, L. A. (editores). What is life? The next fifty years. Speculations on the future of Biology. Cambridge, Cambridge University Press, 1995.

Apéndice. Sobre “orden a partir del desorden”

(Un experimento del pensamiento)

Consideraremos un “universo”, formado por un “organismo” y un “ambiente“. Veremos como este “organismo” se desordena (en cierto sentido convencional) y después recupera su orden al desordenarse el “ambiente”, considerando conceptos clásicos de Termodinámica Estadística e evitando referencias metafóricas.

Dentro de una pared cilíndrica térmicamente aislante (Figura 1, A)



están delimitados tres compartimientos, (1), (2) y (3), mediante cuatro tabiques perpendiculares a esta pared (a), (b), (c) y (d). En estos compartimientos se encuentran, respectivamente, las cantidades fijas  $n_1$ ,  $n_2$  y  $n_3$  (moles) de gas ideal, siendo  $n_1 < n_2$ . El compartimiento (1) está entre los tabiques (a) y (b); el compartimiento (2), entre (b) y (c) y el (3), entre (c) y (d).

El tabique (a) es térmicamente aislante y está fijo a la pared cilíndrica. El tabique (b) es térmicamente conductor y puede deslizarse como un émbolo dentro de la pared cilíndrica. El tabique (c) es térmicamente conductor y está fijo a la pared cilíndrica. Finalmente, el tabique (d) es térmicamente aislante y puede deslizarse dentro de la pared cilíndrica. Los desplazamientos de los tabiques (b) y (d) pueden ser limitados por trabas removibles.

Inicialmente, la posición del tabique (b), mantenida por las correspondientes trabas, es tal que los compartimientos (a) y (b) tiene un mismo volumen  $V$ .

Soltemos las trabas que retienen el tabique (b), de modo que el volumen de (1) disminuye de  $V$  a  $V_1$  y el volumen de (2) aumenta de  $V$  a  $V_2$ , teniendo en cuenta que  $n_1 < n_2$  (Figura 1, B). Un estudio termodinámico elemental muestra que la variación de entropía del sistema constituido por el conjunto de (1) y (2) es

$$R \left( n_1 \ln \frac{V_1}{V} + n_2 \ln \frac{V_2}{V} \right),$$

siendo  $R$  la constante de los gases.

Esta expresión es positiva cuando  $V_1$  es diferente de  $V_2$ . Llamando “organismo” al sistema constituido por los compartimientos (1) y (2), diríamos que la entropía del “organismo” aumentó espontáneamente.

Veamos cómo el “organismo” recupera su entropía inicial, mediante la participación del compartimiento (3), que llamamos “ambiente”.

Unamos los tabiques (b) y (d) con un vástago, de modo que se desplacen solidariamente (Figura 3, C). Permitamos el desplazamiento del tabique (d), de modo que el volumen de (3) aumente de  $V_{3i}$  a  $V_{3f}$ , estando estos volúmenes determinados por las posiciones de las trabas correspondientes, que habrán sido ajustadas de acuerdo con las condiciones:

$$V_{3f} - V_{3i} = V_1 - V = V \left[ 2 \left( \frac{n_1}{n_1 + n_2} \right) - 1 \right]$$

$$\frac{n_3}{V_{3f}} \geq \frac{n_2 - n_1}{V}$$

El tabique (b), traccionado por el vástago al desplazarse el tabique (d), volverá a su posición inicial (Figura 1, D). La entropía del “organismo” habrá recuperado su valor inicial. Pero ahora la entropía del “ambiente” será mayor que antes, habiendo aumentado en

$$n_3 R \ln \frac{V_{3f}}{V_{3i}}$$

Aunque no fue necesaria ninguna referencia al “orden” en el desarrollo precedente, el aumento de la entropía puede ser interpretado como un aumento del “desorden” (o disminución del “orden”), siempre que la palabra “orden” haya sido dotada de un sentido preciso. Veamos cómo.

El estado de una masa de gas ideal monoatómico, formado por  $N$  moléculas, puede ser especificado mediante  $N$  puntos en un espacio de fases de 6 dimensiones, representando cada molécula por sus tres coordenadas de posición y las tres componentes de su momento (cantidad de movimiento). Este espacio de fases estará dividido en pequeñas celdas, todas del mismo volumen, de acuerdo con una justificación proveniente de la Física Cuántica. Habiendo  $N_1$  puntos representativos en la celda 1,  $N_2$  puntos representativos en la celda 2, ..., y si las moléculas no se distinguen unas de otras, el número de maneras como se pueden distribuir los puntos en el espacio de fases es, de acuerdo con un cálculo combinatorio:

$$\Omega = \frac{N!}{N_1! N_2! \dots}$$

Se observa que  $\Omega$  alcanza su valor máximo,  $N!$ , cuando en ninguna celda hay más de un punto y que su menor valor posible es 1, correspondiendo a la distribución menos uniforme, con todos los puntos en una misma celda. Comparemos el espacio de fases con una bandeja en la cual están dibujadas las celdas y los puntos con fichas colocadas sobre ella. Diríamos que la distribución está más ordenada cuando todas las fichas están en una misma celda ( $\Omega = 1$ ) y que la distribución (o el sistema que ella representa) se desordena cuando un golpe aplicado a la bandeja dispersa las fichas entre las celdas ( $\Omega > 1$ ). Así,  $\Omega$  aparece como indicación del “desorden” del sistema.

En Termodinámica Estadística, la entropía  $S$  se expresa como

$$S = k \ln \Omega ,$$

siendo  $k$  la constante de Boltzmann. Se trata de una definición o un teorema, según la línea de razonamiento que se adopte. En ambos casos, justifica la muchas veces aludida relación entre entropía y “desorden”.

