

Los Estudios de lo Complejo y las Ciencias de la Vida

Jairo Roldán Ch., Ph.D.*

Un estudio filosófico de la biología muestra que uno de los grandes problemas lo constituye la antigua pero siempre presente polémica entre el reduccionismo mecanicista y las ideas que pueden agruparse bajo el término de vitalismo. La base de la primera posición es el mecanicismo, cosmovisión que, con base en una teoría física considerada como de carácter universal, invadió poco a poco casi todo el pensamiento occidental. Algunos de sus aspectos, como la reversibilidad esencial de lo Real, que al final de cuentas sostiene la inexistencia del tiempo vivido, nos conducen, en sus últimas conclusiones lógicas, a la idea, difícil de aceptar, de que la vida sería sólo una ilusión para nosotros, seres dotados de órganos sensoriales y perceptivos demasiado burdos. Eso, unido al hecho de que existen características de los seres vivos que no parecen reducirse de manera evidente a la máquina, metáfora paradigmática del mecanicismo, hace que la confrontación mencionada siga tan viva como siempre.

Los estudios de lo complejo indican una salida a la polémica. Se ha descubierto en efecto que los sistemas físicos con muchas componentes pueden mostrar, en determinadas circunstancias o contexto experimental, un comportamiento, el comportamiento complejo, que difícilmente se puede enmarcar en el mecanicismo. La complejidad apunta hacia un lenguaje, hacia una visión del mundo, según la cual, lejos de reducir la biología a la física llamada fundamental, se tendría mas bien la posibilidad de describir bajo un mismo marco conceptual tanto fenómenos físicos como biológicos, resolviendo así el viejo enfrentamiento.

En este artículo no se profundiza en las ideas vitalistas. Lo que se quiere mostrar es cómo surge en el seno de la física un lenguaje, el de la complejidad,

que se asemeja el lenguaje tradicional de la biología, lo que indica la posibilidad de desarrollar conceptos comunes a ambas ciencias.

El orden del artículo es como sigue: se comienza con una breve introducción a las ideas de lo simple y lo complejo. Luego se presentan los conceptos principales del mecanicismo. A continuación se analizan los seres vivos en el contexto del mecanicismo. Se discute entonces un fenómeno físico de tipo complejo a fin de identificar los aspectos que caracterizan el comportamiento complejo y finalmente se llega a algunas conclusiones.

Lo Simple y lo Complejo

En el lenguaje ordinario se considera simple aquello que no está compuesto, lo elemental, lo formado por un pequeño número de elementos o partes. También lo que es fácil de entender. La etimología de la palabra es la siguiente: viene del latín *simplicis*, *simplex*, que puede traducirse como uno. Lo complejo, en cambio, es lo que está compuesto por elementos diversos. También lo complicado. Lo complejo es un todo hecho de muchas partes relacionadas entre sí, del cual no se conocen perfectamente ni la naturaleza ni el grado de la relación entre las partes. La etimología de la palabra es como sigue: viene del latín *complexus*, participio pasado del verbo *complecti*, que significa abarcar (una multitud de objetos).

Es claro que algo para ser complejo debe estar compuesto de muchas partes en interacción. Sin embargo un gas diluido está compuesto de un número enorme de elementos y comparado con un copo de nieve o con un ser vivo nos parece muy simple. Debe existir entonces un tipo de *comportamiento* que puede

* Profesor titular, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad del Valle, Cali, Colombia

calificarse de complejo. Y mejor que hablar de sistemas complejos será referirnos a comportamientos complejos.

En la física, las leyes consideradas como *fundamentales*, las de la mecánica clásica, las de la mecánica cuántica, son simples en el sentido de ser pocas e involucrar pocos entes matemáticos. El hecho de que el lenguaje en que se expresan sea abstracto y requiera varios años de estudio para su dominio no significa que las leyes en sí sean complejas. Los ejemplos mediante los cuales se ilustran tales leyes a los estudiantes también son simples: pocos elementos y pocas interacciones. Se entiende que los fenómenos reales son mucho más complejos que esos ejemplos pero que finalmente se *reducen* a las leyes fundamentales que son simples. Entre las ideas implícitas, que se transmiten por medio de la educación y que luego se convierten en intuitivas, están entonces:

1. Las leyes fundamentales son simples.

2. Lo complejo se reduce a lo simple.

La segunda idea significa en el fondo que la complejidad de los fenómenos reales se debe a que las relaciones entre las partes son mal conocidas, pero que una vez lo sean, y *en principio* pueden serlo, se recordará la simplicidad, se reducirá lo complejo a lo simple. Esto nos lleva a una tercera idea que se vuelve también intuitiva:

3. La realidad es simple. La complejidad es una apariencia.

Este *reduccionismo*, cuando se extiende a todos los fenómenos, lleva a considerar los hechos biológicos como reducibles en toda su complejidad a la supuesta simplicidad de las leyes fundamentales de la materia descritas por la física también supuestamente fundamental.

El Mecanicismo

Es una cosmovisión fundamentada en una teoría física, la mecánica clásica, considerada con carácter universal. Esto último significa que se pensaba que todos los fenómenos eran reducibles a esa teoría, la cual valdría en todas las circunstancias. Tomó unos 250 años para consolidarse y a pesar de que ya se ha comprobado que la teoría física no es universal, algunos aspectos de la cosmovisión continúan todavía en el pensamiento de un gran número de científicos, incluidos muchos físicos cuánticos.

Recordemos la teoría y veamos qué se concluye de ella y qué se añade como opción filosófica para tener el mecanicismo.

Las Leyes de la Mecánica Clásica

Pueden expresarse en forma newtoniana, en forma lagrangiana, en forma hamiltoniana o como principio variacional.

Newton:

- 1) Ley de la Inercia.
- 2) $\vec{F} = m\vec{a}$
- 3) Acción y reacción.

Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

Hamilton:

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} \quad \text{y} \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i}$$

Principio de mínima acción

$$\delta S = 0$$

¿Qué se obtiene de las ecuaciones?

- a) Para los sistemas regidos por ellas vale la simetría $t \rightarrow -t$. Son *reversibles*. El tiempo t no es más que un parámetro. Este t difiere del tiempo vivido, el ligado a la vida.
- b) Las ecuaciones, junto con el conocimiento preciso de las condiciones iniciales, dan como resultado el *determinismo total*. Para los sistemas regidos por la mecánica clásica el pasado y el futuro están contenidos en el presente.

Analicemos un poco este asunto del determinismo total. La aceptación *en principio* de la posibilidad de conocer con precisión infinita el estado inicial del sistema implica que se acepta la noción de un estado *objetivo*, *en sí*, independiente de la existencia y del conocimiento del observador. En ese sentido el determinismo está ligado con:

c) El *objetivismo o realismo*. Sin la noción de estado objetivo, aún con la existencia de ecuaciones diferenciales continuas, no se tendrá determinismo. Decir que se tiene determinismo debido a que las ecuaciones son deterministas, en el sentido de que a partir de unas condiciones iniciales dadas se pueden determinar con certezas las condiciones posteriores, es fuente de malentendidos, pues es necesario también que tales condiciones sean posibles, lo que en el caso de la física significa la aceptación de la noción de estado objetivo. En la mecánica cuántica, en su interpretación ortodoxa, no se sostiene la noción de estado objetivo y por lo tanto no se tiene determinismo a pesar de que las ecuaciones son "deterministas" o "causales".

Profundicemos más este asunto: ¿Qué significa aceptar que *en principio* se puede obtener una información infinitamente precisa del estado del sistema? En la práctica esto jamás se obtiene. Laplace imagina una «inteligencia suprema» o un Demonio, como a veces se le conoce, que sí lo puede. En sus propias palabras:

"Una inteligencia tal, incluiría en la misma fórmula los movimientos de los más grandes cuerpos del universo y el del más ligero de los átomos; nada sería incierto para ella, y el futuro, como el pasado, estaría presente ante sus ojos".

O sea, este Demonio puede observar el estado en sí, puede observar "desde afuera" el sistema, puede separarse totalmente de él. ¿De donde viene ese convencimiento de la existencia de un estado objetivo posible de conocer si no en la práctica, sí en principio?.

Para los sistemas clásicos estables, que se pensaba constituían la regla, el hecho de que en la práctica siempre haya una imprecisión en el conocimiento de las condiciones iniciales no tiene consecuencias en el sentido de que las predicciones van a tener la misma imprecisión. Las diferencias entre dos estados iniciales cercanos lleva a predicciones de estados finales igualmente cercanos. Por ello se considera que no hay necesidad de llegar a una precisión infinita para hacer predicciones con una precisión por debajo de lo que detectan nuestros aparatos. Siempre podemos mejorar nuestras predicciones sin necesidad de llegar al límite de precisión infinita en las condiciones iniciales. Para conocer, por ejemplo, la posición final de un cohete con una precisión veinte veces mejor, basta conocer las condiciones iniciales con una precisión veinte veces mayor. Los límites a la precisión de los estados finales los coloca solamente la tecnología del momento.

Sin embargo, Poincaré descubrió a principios de siglo lo que hoy se conoce como *sistemas con inestabilidad dinámica o sistemas caóticos*. Para tales

sistemas, dos conjuntos de condiciones iniciales tan cercanos que en la práctica sean indistinguibles darán como resultado estados futuros enormemente diferentes. No importa en la práctica cuán preciso se haga el conocimiento de las condiciones iniciales, en tanto exista una imprecisión tan pequeña como se quiera, la imprecisión futura del estado crecerá exponencialmente con el tiempo. Esta *sensibilidad a las condiciones iniciales* significa que la única manera en que se pueden hacer predicciones con algún grado de precisión es conociendo con precisión absolutamente infinita las condiciones iniciales.

¿Es posible para tales sistemas caóticos seguir sosteniendo las ideas de estado objetivo y de determinismo? ¿Es posible seguir imaginando el demonio de Laplace? Estrictamente sí, pues se puede suponer que tal Demonio puede llegar a la precisión infinita, lo que significa que puede pasar al límite matemático de conocer un punto sin dimensiones en el espacio de fase. Es claro que este nuevo Demonio es mucho menos humano que el original, que sólo precisaba tener sentidos mucho más potentes que los de un ser humano y podía ser simplemente un potente computador, para hablar en términos de la tecnología contemporánea.

De hecho John von Neumann, uno de los fundadores de la cibernética, parece que construyó su primer computador con el fin de lograr un control sobre el clima, bajo el supuesto determinista de que conociendo y procesando suficientes datos sobre la atmósfera se lograrían predicciones del clima cada vez mejores, logrando liberar a la humanidad del sometimiento a las turbulencias climáticas. Vale la pena anotar que uno de los desarrollos que impulsaron los estudios de lo complejo fue el descubrimiento hecho por el meteorólogo Edward Lorenz, quien escribió un modelo sencillo de computador relacionando las variables relevantes en el estudio del clima y se encontró con el carácter caótico de la atmósfera. El hecho de que la atmósfera sea un sistema sensible a las condiciones iniciales significa que, aún si fuese posible llenar toda la atmósfera de la tierra con un enorme arreglo de instrumentos de medida, no sería posible hacer predicciones a largo plazo, puesto que siempre habría alguna imprecisión en las medidas de los instrumentos y la naturaleza caótica de la atmósfera haría que estas imprecisiones se ampliaran exponencialmente con el tiempo.

Lo anterior ha dado origen a la metáfora conocida como el *efecto mariposa*: el que una mariposa bata o no sus alas en algún lugar del mundo (pequeña perturbación) puede definir si sucede o no una tormenta en algún otro lugar del mundo.

Volviendo al nuevo Demonio, éste tiene que poder conocer un punto sin dimensiones, que para un ser humano no constituye más que una abstracción. Para sistemas caóticos, el determinismo estricto no tiene entonces la misma fuerza de convicción que para sistemas estables.

Nótese que cuando Poincaré hizo su descubrimiento, hacía aproximadamente un siglo que el mecanicismo había quedado firmemente establecido. Los sistemas con inestabilidad dinámica pasaron a ser considerados en física como una rareza matemática, a pesar de que Poincaré mostró que bastaba considerar tres o más cuerpos astronómicos en interacción para tener un sistema caótico. El hecho de que por esa época se descubrieron los fenómenos cuánticos que, en un sentido, devastaban el edificio de la física clásica, seguramente contribuyó a que, en general, la atención de los físicos sólo viniese a enfocarse hacia los sistemas con inestabilidad dinámica a partir de la década del 60.

Otro aspecto ligado al determinismo es que sólo acepta causas inmediatas, causas eficientes y no causas finales. Se rechaza la teleología e incluso se llega a decir, como el biólogo Monod, que lo que caracteriza a la ciencia es la exclusión de causas finales. Se considera que conocidas las partes que componen un sistema, sus interacciones y las condiciones iniciales, es posible deducir todo el comportamiento del sistema. O sea que el todo no es más que la suma de sus partes. Y las partes se pueden concebir conceptualmente *separadas entre sí*, en el sentido de que si bien están en interacción, se pueden pensar como poseyendo un estado en sí el cual no depende de las propiedades del todo, si es que existe algo como un todo que no se reduzca finalmente a las partes y sus interacciones.

Se tiene entonces una *separabilidad de las partes entre sí*. El objetivismo además implica una *separabilidad estricta entre el observador y lo observado*.

La relación mencionada entre el todo y sus partes es tan importante que merece catalogarse como otro de los aspectos principales del mecanicismo.

d) *Reducción del todo a las partes o relación puramente mecánica entre el todo y las partes*. La metáfora adecuada para ilustrar esta idea es la de la máquina. A pesar de que se debe invocar una mente con un propósito que diseña la máquina, una vez diseñada, se puede entender totalmente sólo a partir de sus partes y las interacciones entre ellas, sin acudir ni a nociones teleológicas ni a conceptos holísticos.

Los seres vivos

Aunque no se menciona explícitamente en la mayoría de los escritos que tratan sobre la polémica entre el vitalismo y el reduccionismo mecanicista, la pretensión de reducir los fenómenos biológicos al mecanicismo lleva implícita una conclusión difícil de aceptar, según la cual la vida no sería más que una apariencia para nosotros producida por lo burdo de nuestros sentidos y nuestras percepciones. Hemos visto en efecto que, para el mecanicista, su marco conceptual describe la Realidad tal como es, independiente del sujeto que observa, de su conocimiento y también de su existencia. Y esa Realidad es esencialmente reversible. Por ello la irreversibilidad observada en la Termodinámica se debería sólo a la ignorancia del sujeto acerca del estado objetivo del objeto observado, objeto macroscópico compuesto de muchas partes. Como el tiempo que vivimos, el que observamos, es en esencia irreversible, la conclusión lógica del partidario del mecanicismo es que ese tiempo no es real, sino sólo aparente, ya que el tiempo real está descrito por el parámetro t reversible de las ecuaciones dinámicas. Se precisa de la lucidez y del coraje de un Einstein para no sólo afirmar que la irreversibilidad no es más que una ilusión, sino también para aceptar la conclusión lógica que de allí se sigue, conclusión que lo lleva a observar que, en el fondo, el dolor de la pérdida de su gran amigo Michele Angelo Besso, debe matizarse al recordar que el tiempo vivido, la distinción entre pasado, presente y futuro, no es más que una ilusión tenaz. Pero si tal distinción, si el tiempo que vivimos y la irreversibilidad no son más que una ilusión, también lo es entonces la vida constituida fundamentalmente por procesos irreversibles. Vida y muerte no serían más que una ilusión, lo cual permite entender mejor la expresión de Einstein, de nuevo con relación a la muerte de Besso, cuando afirma que el hecho de que Michele lo haya precedido en abandonar este mundo extraño, no tiene la menor importancia. ¡Y es que una ilusión no tiene verdaderamente importancia!

La conclusión anterior muestra claramente que el programa de reducir la biología al marco mecanicista no es nada evidente. A ello se añade que los seres vivos, además de la irreversibilidad, presentan otras características que no parecen poderse reducir fácilmente al marco conceptual formado por el mecanicismo. Veamos algunas de tales características. Esas dificultades para reducir un organismo a una máquina, donde se tiene la relación entre el todo y la parte invocadas por el mecanicismo, están detrás de las ideas que podemos calificar como vitalistas, a pesar de que no necesariamente invoquen un tipo de fuerza vital o algo por el estilo.

Comparemos entonces un ser vivo con una máquina (de tuercas y tornillos, no con máquinas informáticas como el computador), añadiendo que la consideración de un ser vivo como reducible al tipo de reducción todo-partes mecanicistas es ó una opción metafísica ó un programa que parece más lejos cada vez de lograrse.

En el *organismo* existe una complejidad esencial, en el sentido que no parece evidente la reducción de su comportamiento a unas leyes simples regulando las interacciones de sus partes. La *máquina* es reducible a la simplicidad de las leyes que rigen las interacciones entre las partes y su complejidad no es más que una apariencia subjetiva debida a nuestras limitaciones como humanos.

En el *organismo* el todo es más que la parte, hay emergencia de cualidades: diferenciación de las células y especialización en órganos. En la *máquina* no hay emergencia, el todo no es más que la suma de las partes.

Hay una *totalidad* del *organismo*: cada parte sólo desarrolla plenamente sus potencialidades como parte del todo. Con dificultad sobrevive una célula fuera del organismo, mucho menos va a desarrollar a plenitud sus potencialidades fuera de él. (Caso de células especializadas) En la *máquina* existe fragmentación: las partes están esencialmente separadas.

Puede invocarse *teleología* respecto al *organismo*. Para la *máquina* cualquier teleología es sólo apariencia, el todo se reduce a sus partes y a sus interacciones y está sujeto sólo a causas eficientes. Ahora bien ¿qué se puede decir frente al hecho de que quien diseña la máquina tiene una finalidad en su mente? Se puede responder que aún así es posible, a partir del mero análisis de las partes y de las interacciones entre ellas, deducir la finalidad de la máquina. Se puede, por ejemplo, considerar una máquina "apagada", que no esté en funcionamiento. El reduccionismo mecanicista sostendrá que con sólo analizarla en sus partes y conocer las interacciones entre ellas, locales, de tipo determinista, explicables sólo por causas eficientes, se deducirá el funcionamiento de la máquina, su finalidad, lo que tenía el diseñador en su mente.

Un hecho respecto a un *organismo* es que si lo desarmamos en sus partes lo matamos. En cambio podemos armar y desarmar una *máquina*. El partidario del mecanicismo puede alegar que el llegar a desarmar un ser vivo y volverlo a revivir a l rearmarlo es sólo una limitación técnica del momento.

En una *máquina* las piezas de repuesto no tienen "historia". Los repuestos más aceptables son los nuevos. Hasta ahora para un *organismo* todo

"repuesto" mayor tiene historia, viene de otro organismo. El mecanicista de nuevo puede alegar que sólo es cuestión de técnica.

El *organismo* se adapta, evoluciona, no así la *máquina*.

Un Fenómeno Físico de Tipo Complejo

Para finalizar analicemos un solo fenómeno físico de tipo complejo: las celdas de Bénard, descubiertas en 1900, para ver como se utiliza en su descripción un lenguaje similar al de la biología.

Sea una capa de fluido, por ejemplo agua, entre dos placas horizontales paralelas cuyas dimensiones son mucho mayores que el ancho entre las placas. Inicialmente ambas placas están a la misma temperatura y se tiene entonces una situación de equilibrio. Se crea luego una diferencia de temperatura comunicando energía calórica a la placa de abajo, de modo que si la temperatura de la placa de abajo es T_2 y la de la placa de arriba es T_1 entonces $\Delta T = T_2 - T_1 > 0$.

La energía calórica comunicada es una condición que lleva al sistema fuera del equilibrio y se conoce como ligadura de no-equilibrio.

Cuando la diferencia de temperatura es pequeña, el sistema adopta un estado único y sencillo en el que se transporta calor de la placa inferior a la superior. Este fenómeno es la conocida conducción térmica.

Si nos alejamos cada vez mas del equilibrio llegaremos a una diferencia de temperatura crítica cuando el fluido comienza a moverse masivamente. Se trata de la convección térmica. Este movimiento no es aleatorio ni desordenado: el fluido se estructura en una serie de pequeñas celdas de convección. En cada celda el fluido está rotando: en unas en el sentido del giro de las manecillas del reloj, en otras en el sentido contrario. Mas precisamente: la dirección de rotación se alterna de una celda a la otra a lo largo del eje horizontal.

Los aspectos relevantes del fenómeno son los siguientes:

La dimensión espacial característica de una celda de Bénard en condiciones usuales de laboratorio es del orden de milímetros (10^{-1} cm) mientras que la escala espacial característica de las fuerzas intermoleculares es del orden de los angstroms (10^{-8} cm): las fuerzas intermoleculares operan en distancias iguales aproximadamente al tamaño de una molécula, mientras que una sólo celda de Bénard

involucra aproximadamente 10^{20} moléculas. Se tiene entonces un número enorme de partículas que se comportan de modo coherente a pesar del movimiento térmico aleatorio de cada una de ellas. Se tiene *emergencia* de un comportamiento global que no puede reducirse a las interacciones locales de las partes. De la interacción entre el movimiento térmico de las partes y la ligadura de no-equilibrio (fuente calórica que calienta la placa de abajo) emerge una complejidad organizada.

El experimento es perfectamente reproducible. En tanto las condiciones experimentales: fluido, placas, dimensiones, fuente externa, sean iguales, las celdas surgirán a la misma temperatura crítica y aparecerán estructuradas de modo que a una celda girando en la dirección de las manecillas del reloj, le sigue otra que gira en la dirección contraria. Una vez que se establece una dirección de giro en una celda, tal dirección no cambia.

Sin embargo, no importando cuán sofisticado sea el control del arreglo experimental, hay dos situaciones cualitativamente diferentes que pueden tener lugar justo después de la diferencia de temperatura crítica. Si numeramos las celdas, una situación posible es que las impares giren en el sentido de las manecillas del reloj y las pares en la dirección contraria. La otra situación posible es que sean las pares las que giren en la dirección de las manecillas del reloj y las impares las que giren en la dirección contraria.

O sea: en cuanto se supere la diferencia de temperatura crítica sabemos que aparecerán las celdas. Este fenómeno está sujeto a un determinismo estricto. Por contraste, la dirección de la rotación de las celdas es impredecible e incontrolable. Sólo el azar, en la forma de una perturbación particular, que puede haber prevalecido en el momento del experimento, decidirá si una celda gira en una dirección o en la otra.

Tenemos entonces una cooperación entre azar y necesidad o determinismo que nos recuerda la dualidad entre mutaciones y la selección natural, familiar en la biología desde la época de Darwin.

Las celdas de Bénard ilustran un comportamiento típico lejos del equilibrio, que es la aparición de varias soluciones posibles para un mismo valor de parámetros. En nuestro ejemplo hay un solo parámetro: la diferencia de temperatura entre las placas, y dos posibles. Sólo el azar decide cuál de éstas se realiza. El hecho de que sólo una entre varias posibilidades ocurra, le da al sistema una *dimensión histórica*: un tipo de memoria de un evento pasado que tuvo lugar en un momento crítico y que afecta la *evolución* futura del sistema. El punto crítico a partir del cual puede producirse un nuevo estado macroscópico, una nueva estructura macroscópica, se llama una bifurcación.

Si analizamos las ecuaciones que describen sistemas como el que nos lleva a las celdas de Bénard, encontraremos que son ecuaciones no lineales que relacionan entre sí variables termodinámicas, macroscópicas. Ellas describen la actividad del sistema como un todo. La naturaleza de tales ecuaciones determina la posibilidad de que la acción de las componentes microscópicas, las partes, dé como resultado la ampliación de las fluctuaciones y la formación de nuevas estructuras: *El todo determina las potencialidades que tienen las partes*. Pero es la actividad de las partes, en formas de fluctuaciones, lo que determina qué nueva estructura macroscópica del sistema como un todo se tendrá: *Las partes determinan la estructura del todo*. La parte y el todo se determinan mutuamente.

Conclusiones

Las características del fenómeno anterior no se enmarcan dentro de la cosmovisión mecanicista y son similares a las características propias a los seres vivos:

1. Relación no mecánica entre el todo y las partes.
2. Emergencia de cualidades globales que no se reducen a las interacciones locales.
3. Combinación entre azar y necesidad.
4. Irreversibilidad esencial.
5. Evolución. Dimensión histórica del fenómeno.
6. Determinación mutua entre el todo y la parte.

Vemos entonces la emergencia de un lenguaje similar al lenguaje típico de la biología para describir comportamientos de sistemas físicos y químicos conocidos como comportamientos complejos.

La complejidad abre entonces el camino para disolver la vieja polémica entre el reduccionismo mecanicista y el vitalismo mediante la creación de un marco conceptual común tanto a la física como a la biología.

Bibliografía

1. Waddington, C.H. y otros. *Hacia una biología teórica*, Alianza Editorial, S.A., Madrid, 1976.
2. Ruse, M.; *La filosofía de la biología*, Alianza Ed., S.A., Madrid, 1979.
3. Ayala, F.J.; Dobzhansky, T.; Eds. *Estudios sobre la filosofía de la biología*, Editorial Ariel, S.A., Barcelona, 1983.
4. Laplace, P. S. Marquis de; *A Philosophical Essay on Probabilities*, Dover Publications Inc. New York, 1995.
5. Prigogine, I.; Stengers, I.; *La nueva alianza*, Alianza Editorial, S.A., Madrid, 1983.
6. Nicolis, G.; Prigogine, I.; *Exploring Complexity*, W.H. Freeman and company, New York, 1989.
7. Gleik, J.; *La théorie du Chaos*, Flammarion, Paris, 1991.
8. Lorenz, E.N.; *La esencia del caos*, Editorial Debate, S.A., Madrid, 1995.
9. Einstein, A.; Besso, M.; *Correspondance 1903-1955*. Collection Savoir, Hermann, Paris, 1979.
10. Monod, J.; *Le hasard et la nécessité*, Éd. du Seuil, Paris, 1970.