

ENSAYO*

EVOLUCION DE LOS CONCEPTOS BIOLÓGICOS

Por Antonio García-Bellido

No solamente los conceptos sino aun los objetivos de una ciencia varían a lo largo de su historia. Estos cambios vienen condicionados por avances del conocimiento en la propia ciencia, por interferencias con otras ciencias, por cambios filosóficos y aun sociales de actitud acerca de lo que se puede conocer o merece conocerse. Esto ha afectado naturalmente también a la Biología. Así pues el discurrir sobre lo que son los avances recientes en el conocimiento biológico es imposible sin un enfoque histórico. Vamos a



ANTONIO GARCIA-BELLIDO es Doctor en Ciencias biológicas por la Universidad Complutense y Profesor de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, organismo en el que desempeña la función de Director del Instituto de Genética. Ha publicado numerosos trabajos científicos.

* BAJO la rúbrica de «Ensayo» el Boletín Informativo de la Fundación Juan March publica cada mes una colaboración original y exclusiva de un especialista sobre un aspecto de un tema general. Anteriormente fueron objeto de estos ensayos temas relativos a la Ciencia, el Lenguaje, el Arte, la Historia y la Prensa. El tema desarrollado actualmente es la Biología.

En Boletines anteriores se han publicado: *Control electrónico del cerebro*, por José M. Rodríguez Delgado, Director del Departamento de Fisiología de la Universidad Autónoma de Madrid; *Bioquímica de la nutrición*, por Francisco Grande Covián, Director del Instituto de Investigación de Bioquímica y Nutrición «Don Juan Carlos I-Fundación Cuenca Villoro»; *Las fronteras de la Ecología*, por Ramón Margalef, Profesor de Ecología de la Universidad de Barcelona; *Alteraciones del desarrollo cerebral*, por Federico Mayor Zaragoza, Catedrático de Bioquímica y Biología Molecular de la Universidad Autónoma de Madrid; *La bioconversión de la energía solar y la crisis energética y alimentaria*, por Manuel Losada, Catedrático de Bioquímica de la Universidad de Sevilla; *Aspectos biológicos del abuso de drogas*, por Josep Laporte, Catedrático de Terapéutica y Farmacología Clínica de la Universidad Autónoma de Barcelona; *Evolución y Darwinismo*, por Francisco J. Ayala, Profesor de Genética de la Universidad de California en Davis; *La genética del cáncer y los virus*, por María Luisa Durán-Reynals, Profesora de Patología del Albert Einstein College de Nueva York; *El origen de la vida*, por Juan Oró, Profesor de Bioquímica de la Universidad de Houston; *La genética de poblaciones*, por Antonio Prevosti, Catedrático de Genética de la Universidad de Barcelona; y *Los enzimas, agentes de la vida*, por Alberto Sols, Catedrático de Bioquímica de la Universidad Autónoma de Madrid.

tratar en lo que sigue de analizar con qué perspectiva miramos los biólogos lo que estamos haciendo y qué es lo que queremos entender.

La Biología es hoy día una ciencia positiva, que ha encontrado, o espera encontrar, leyes propias que gobiernen la compleja fenomenología de los seres vivos; ha establecido contactos con otras ciencias, como la Física y la Química, e intenta estudiar con su método y explicar en sus términos fenómenos psicológicos y aún sociales. El método epistemológico por el que la Biología avanza es el mismo que en otras ciencias positivas: a) aislamiento de un círculo de fenómenos; b) análisis de sus elementos invariantes; c) postulado de una hipótesis de síntesis general que explique todos o la mayoría de los fenómenos en términos de causa-efecto; y d) comprobación, por inducción o experimentos, de este postulado y su deshecho o conversión en teoría o ley natural. Este procedimiento consta, pues, de dos periodos analíticos; uno de búsqueda de la hipótesis, llamado periodo romántico, y otro de comprobación o generalización de la validez de la hipótesis, llamado periodo académico.

Durante este periodo romántico se ensayan nuevos métodos de análisis. Estos métodos corresponden a dos actitudes complementarias; la reduccionista, que trata de explicar la fenomenología en términos de unidades o variables en un nivel de complejidad más sencillo, y la integrista, que intenta descubrir las leyes de interacción que gobiernan la fenomenología de cada nivel. Durante el periodo académico ambas actitudes se funden y nuevos conceptos o integraciones entre niveles emergen. La Biología ha pasado ya varias veces por las etapas de análisis y de síntesis mencionadas. En ellas se han postulado y comprobado grandes teorías unitarias.

La diversidad orgánica

El primer paso fue realizar un inventario de los seres que se consideraban dotados de vida. Hasta el siglo XVIII se habían hecho varios, inclusive por Aristóteles, pero fue el sistema utilizado por Linneo el que ha resultado definitivo. Estaba basado en el postulado de que la especie era una entidad natural. Entonces, la idea de una discontinuidad en los seres vivos era un postulado dogmático más que un descubrimiento del análisis científico y, de hecho, el concepto de especie como entidad biológica objetiva sólo se ha establecido muy recientemente. Por ello el valor de esta clasificación de los seres vivos se debe a la ordenación de especies en grupos «naturales». Esta ordenación estaba basada

en el análisis comparativo de caracteres morfológicos. Este método ha sido el instrumento lógico que preparó el camino a la anatomía comparada y posteriormente a la teoría de una evolución orgánica.

El análisis morfológico detallado de especies próximas lleva el postulado de que éstas pueden estar relacionadas por parentesco. La teoría de la evolución resulta de la inferencia de que todos los seres vivos, no sólo los pertenecientes a una especie, están ligados por herencia. En estos términos el postulado es indemostrable. Sin embargo, la acumulación creciente de datos que surge después no hace sino confirmar la validez de la hipótesis. La teoría de la evolución tiene sobre todo un valor heurístico: sirve para ordenar y poner en perspectiva una ingente variedad de fenómenos biológicos: es la primera teoría unitaria en Biología. Es interesante resaltar que la explicación causal de cómo ocurría la evolución dada por Darwin, la selección natural de la variabilidad hereditaria, no satisfizo a los científicos de la época y aún hoy en día es motivo de debate. Lo importante es que durante el período académico de esta teoría se delimitan precisamente los problemas, los objetivos, que van a ocupar a los biólogos de las generaciones siguientes. El concepto de evolución plantea el problema de la herencia, el del origen y naturaleza de la variación y el de selección y adaptación. Fuera de la propia Biología la teoría de la evolución supone, en la segunda mitad del siglo XIX, una base científica para la incipiente sociología y aun para la propia filosofía.

Células

La teoría celular postulada por Schleiden y Schwann antes que la de la evolución, pero consolidada después, permitirá entender la base biológica de la continuidad en la evolución en términos materiales. Resultado de la acumulación de información durante los siglos precedentes, y del uso de instrumentos, cristaliza a mediados del siglo XIX la idea de que la unidad de construcción invariante en los seres vivos es la célula. Es el resultado del primer enfoque reduccionista y estructural en Biología. No solamente todos los tejidos estaban hechos de células, sino que se derivaban por proliferación celular de un huevo, y aun los propios gametos eran células. Con ello dejan de tener sentido dos viejas concepciones: la de generación espontánea y continua y la de una creación *ab initio* independiente para cada especie. La teoría de la evolución y la teoría celular propo-

nen que los seres vivos tienen una unidad de origen y una continuidad a través de generaciones basada en una estructura material: la célula.

De nuevo esta concepción unitaria sirve para enfocar una serie de problemas biológicos en términos susceptibles de análisis. El enfoque reduccionista continúa buscando estructuras por debajo del nivel celular y se descubren una serie de organelas celulares como constituyentes invariantes de células: fundamentalmente el núcleo y los cromosomas. La constancia del número de éstos durante las divisiones celulares de un organismo y entre individuos de la misma especie y su reducción a la mitad durante la meiosis, ofrecerán la base material que proponen y requieren las leyes de la herencia. El estudio microscópico del citoplasma descubre la constancia y abundancia de una sustancia hialina, relacionada más tarde con proteínas, y responsable de una serie de funciones propias de la vida. La interdependencia entre estructuras, organización y funciones vitales se establece, pero aún no se entienden las relaciones causales entre ellas. Este dualismo estructura-función queda como reducto del vitalismo clásico hasta que el reduccionismo llega al nivel molecular.

El papel que juega la organización determinando características propias de la vida es más patente en el estudio de cualquier proceso biológico. El desarrollo de los organismos es un modelo: ¿cómo se construye, con exactitud y diferencias propias de especie, un organismo a partir de una célula huevo? El estudio comparado del desarrollo de diferentes organismos descubre que también durante la ontogénesis aparecen registradas etapas evolutivas anteriores. La descripción del desarrollo en términos celulares no hace sino resaltar la extraordinaria variedad y complejidad del proceso. A mediados del siglo XIX, cuando se introduce en biología el método experimental, se trata de descubrir los mecanismos causales que gobiernan el desarrollo. La complejidad de las interacciones y la imposibilidad, por entonces, de manipular el componente hereditario, impide una interpretación mecanicista del desarrollo. Experimentos muestran que el núcleo y aun los cromosomas son determinantes de un desarrollo normal, pero las reglas de cómo las características de especie se transmiten y se manifiestan en construir sistemas —cómo se pueden generar organizaciones complejas a partir de organizaciones sencillas— sigue siendo un misterio. Para poder explicarlo era necesario entender qué es lo que se hereda, qué transmiten los gametos de una generación a otra. La teoría ce-

lular había puesto en el mismo contexto, reducido a la misma base material, la evolución, el desarrollo y la herencia.

Genes

A finales del siglo XIX, pues, la herencia se convierte en el nudo gordiano de la Biología. La teoría de la selección plantea el problema de la naturaleza material de los caracteres que se seleccionan en la herencia. La embriología dejaba claro que los órganos adultos, y por extensión, los caracteres sujetos de selección no están en el huevo sino que se hacen durante el desarrollo. Las variaciones entre individuos deben estar en las normas de construcción de estos caracteres. El salto lógico para el biólogo materialista de esta época parece insalvable: identificar la base material de unas normas. El problema es aún mayor porque las variaciones observadas en los individuos de una especie parecen formar series continuas. ¿Cuál puede ser la base material de unos determinantes que definen intervalos infinitamente pequeños? El problema se resolvió al encontrar que en algunos casos —luego en más y finalmente en todos— esto no era así. El descubrimiento de la mutación (de Vries) de las variaciones discontinuas, y su comportamiento en la descendencia de cruzamientos entre individuos que las llevaban, permitió a Mendel elaborar las leyes de la herencia. Estas variaciones se comportaban como dependientes de factores discretos que segregaban en la descendencia sin perder su identidad y sin mezclarse. Cualquiera que fuese su naturaleza, se comportaban como partículas que se transmitían por los gametos y que generaban la complejidad del individuo.

El descubrimiento de la variación discontinua ha sido uno de los más decisivos de la Biología. La herencia tenía unidades que se comportaban en los cruzamientos con leyes propias. En la elaboración de las leyes de la herencia intervinieron las dos actitudes reduccionistas e integristas, el método experimental, una lógica mecanicista y un planteamiento matemático. Estas actitudes y métodos se habían usado por separado antes en Biología y en otras ciencias, pero pasan a convertirse en el método de análisis biológico definitivamente desde entonces. El problema inmediato era saber en qué consistían estos factores y cómo se expresaban en los caracteres finales observables. Era un problema difícilmente abordable por dos razones. Las conclusiones de los experimentos eran puramente formales; reglas de interacciones o inferencias sin fundamento

material. Por otro lado, las predicciones de las leyes eran indeterministas, basadas no en relaciones de causa-efecto, sino en estadísticas. Este idealismo era incompatible con la mentalidad materialista y mecanicista del biólogo de principios de nuestro siglo.

Sin embargo, queda pronto establecido que los factores hereditarios (llamados más tarde genes) tienen una base material. Se transmiten intactos, como los cromosomas, de generación en generación celular, de padres a hijos. La correspondencia entre el comportamiento de los cromosomas en las meiosis y la segregación de los factores hereditarios, la ocurrencia de recombinación entre fragmentos de cromosomas y la correspondiente recombinación entre factores, sitúan a éstos en los cromosomas. Era de esperar que la naturaleza de estos factores se encontraría en la constitución química de los cromosomas.

El otro aspecto del problema es saber cómo estos factores se expresan en caracteres visibles: qué propiedad tienen los genes de generar estructuras y organizaciones propias del estado mutante o normal de cada gene. La importancia de su efecto, inferida de la existencia de mutantes que modifican radicalmente órganos y aun causan la muerte del individuo, permite suponer que los genes controlan procesos básicos durante el desarrollo. Puesto que cada factor mutante se expresa independientemente de los otros y puede afectar al mismo órgano o carácter, es posible que el conjunto de caracteres se derive del efecto aditivo de los factores hereditarios. El desarrollo, pues, debe estar controlado por señales discretas, cada una afectando un proceso y cuya interacción lleva al individuo adulto. Cuál sea la naturaleza de estas señales y de sus interacciones es, para el biólogo de la primera mitad de este siglo, un problema que confía se pueda resolver en términos de enzimas y reacciones bioquímicas.

La teoría particular de la herencia, por último, ofrece la base material de la evolución. La selección puede operar ya sobre factores discretos y elegir los favorables a costa de los desfavorables. Posiblemente la evolución ha consistido en la aparición de nuevas combinaciones génicas, suministradas por la mutación, más adecuadas para cada uno de los ambientes ecológicos a los que las poblaciones se ven expuestas. En líneas generales la explicación es suficiente. Problemas de detalle —por ejemplo, cómo la selección opera sobre poblaciones de individuos y cómo surgen la discontinuidad de especies— pasan a un primer plano más tarde.

La Biología ha encontrado en las leyes de la herencia y en el descubrimiento de la existencia de unidades génicas la primera gran teoría unitaria de la evolución y del desarrollo. El mismo enfoque reduccionista que permite, a principios del siglo, describir la evolución en términos de genes, y la anatomía y el desarrollo en términos de células, va a llevar la fisiología al nivel molecular.

Moléculas

Durante el siglo XIX la química y la fisiología, que empiezan siendo dos ramas del conocimiento con objetivos muy distintos, se aproximan. Esto ocurre como consecuencia de una postura filosófica: el mecanicismo o materialismo. Este postula que los fenómenos propios de los seres vivos pueden explicarse con las mismas leyes y en los mismos términos que los fenómenos físicos y químicos, e intenta demostrarlo. El esfuerzo es largo y el acervo de conocimiento obtenido grandioso. Se identifican los componentes químicos de los seres vivos y se comprueba que tienen los mismos átomos que la materia inerte. Se aíslan y definen diferentes tipos de moléculas orgánicas compuestas de estos átomos. Moléculas de diferentes tipos deben tener diferentes funciones, puesto que aparecen asociadas a órganos, estructuras y procesos distintos. En procesos propiamente biológicos —como la respiración, la digestión, la contracción muscular y quizás la conducción nerviosa—, estas moléculas no sólo participan sino que se transforman. Más aún, algunos de estos procesos se pueden aislar y aun reproducir fuera del organismo vivo. La síntesis en el laboratorio de las primeras moléculas orgánicas a partir de sus elementos inorgánicos, la simulación mecánica de procesos biológicos, como la fecundación artificial o la preparación de soluciones fisiológicas que pueden reemplazar muchas de las funciones de fluidos como la sangre, parecían vaticinar una pronta explicación mecanicista de la vida.

Este optimismo iba a resultar prematuro. Precisamente del estudio detallado de estos procesos va a surgir el cambio de mentalidad del biólogo moderno. El descubrimiento no sólo de una complejidad, sino de la existencia de niveles de complejidad, con leyes no directamente predecibles a partir de las propiedades de los elementos del nivel inferior, lo hacen precisamente aquellos investigadores que más contribuyeron al éxito del enfoque materialista. Pasteur, Liebig, Driesch, Claude Bernard, Helmholtz, etc., se

enfrentaron con la existencia de moléculas asimétricas, de reacciones específicas controladas por catalizadores específicos, de procesos dependientes de estructuras y organización, como el desarrollo y el funcionamiento del sistema nervioso, y con la existencia de interacciones hormonales específicas entre órganos, la ocurrencia de homeostasis y de control por productos finales, etc. El enfrentamiento con esta complejidad estructural y con esta extraordinaria especificidad molecular lleva a una reacción de humildad y desconfianza en sí mismo, al biólogo de los años treinta de nuestro siglo. En consecuencia, éste se especializa y aísla en el estudio de un proceso particular, de un nivel particular; ha perdido la esperanza de explicar los fenómenos biológicos en términos de leyes generales válidas para todos los niveles. Más aún, resulta claro que, para atender en términos causales un proceso, necesita por lo pronto su descripción detallada en términos de todos los elementos que interviene, antes de poder aventurarse a cualquier generalización.

El problema empezaba a plantearse desde los niveles más fundamentales: si conociendo los elementos subatómicos el físico de los años treinta no podía explicar la organización del átomo, ¿cómo cabía esperar, a partir de moléculas, entender su organización en sistemas estables supramoleculares? En un nivel biológico básico estaba el problema de conocer la composición molecular de los genes para, quizás a partir de ahí, entender su control de la especificidad orgánica. El análisis bioquímico había llevado a descubrir, por un lado, que en el medio de todo proceso biológico de intercambio de energía, de síntesis o catálisis, había unas moléculas (enzimas) específicas de cada una de las etapas de la reacción. Su análisis químico terminaba determinando que su naturaleza era protéica: el tipo más complejo de moléculas orgánicas conocido, compuesto de unos 20 diferentes tipos de aminoácidos y organizado en una estructura tridimensional. Por otro lado, el análisis genético había localizado el material hereditario de los cromosomas, y por lo tanto, en términos químicos, a sus dos componentes mayoritarios: proteínas y ácidos nucleicos. El mismo análisis había concluido que las variantes hereditarias se expresaban en actividades enzimáticas. De ahí surgía el postulado de que los genes eran enzimas (o proteínas, por extensión) o controlaban su síntesis. Se había llegado a un punto muerto; si las proteínas sirven para sintetizar proteínas, ¿quién y cómo dirigía su propia síntesis?; o alternativamente: si eran capaces las proteínas de replicarse, co-

piándose a sí mismas, ¿cómo además controlaban otros procesos orgánicos de manera específica? Quizás del conocimiento en detalle de la estructura de las proteínas se pudiese explicar algún día su comportamiento. La solución llegó inesperadamente. Era el resultado del enfoque reduccionista: la naturaleza del material hereditario había que estudiarlo en los organismos más sencillos que mostrasen variaciones hereditarias. De experimentos con organismos sencillos, como bacterias y virus, se derivaba que las propiedades hereditarias iban asociadas a los ácidos nucleicos (ADN) y no a las proteínas. El ADN resultaba ser una molécula sencilla formada de la polimerización lineal de sólo cuatro tipos de nucleótidos. Consideraciones teóricas a partir de datos del análisis químico comparativo en diferentes organismos y de un análisis estructural (cristalográfico) del ADN, permitieron a Watson y Crick postular en 1953 un modelo de organización que explicaba su propiedad replicativa. Los experimentos confirmaron rápidamente las predicciones del modelo, a lo largo de toda la escala animal y vegetal. Con ello se había, no sólo descubierto la base material de la herencia sino producido un profundo cambio de mentalidad y de objetivos en Biología. Los métodos genéticos y bioquímicos habían permitido resolver un problema biológico fundamental. La genética molecular iba a resolver en rápida sucesión otros muchos.

El modelo estructural del ADN sugería también un posible mecanismo para la segunda propiedad de material hereditario —su capacidad de determinar la estructura de las proteínas. Era sólo necesario que la secuencia de nucleótidos del ADN dirigiese la síntesis coordinada de la secuencia de aminoácidos de las proteínas. En corto tiempo la predicción se vio de nuevo comprobada como cierta con el descubrimiento del ARN mensajero, una copia lineal del ADN que abandona los cromosomas y que sirve de molde sobre el que los aminoácidos se incorporan linealmente en el orden característico de cada proteína. El código que determina qué aminoácidos corresponden a qué secuencia de nucleótidos se descifró rápidamente. La sustitución errónea de un nucleótido en el ADN se expresa, pues, en la sustitución de un aminoácido en la proteína: la base material de la mutación se llega a entender. En un período menor de diez años el proceso de replicación y de expresión del material hereditario se conoce en sus detalles: la lógica funcional del ADN y de las proteínas se entiende. Con ello el problema del desarrollo y de la evolución es asequible a un enfoque nuevo.

En los mismos años 50-60 el análisis de los procesos de fotosíntesis y de respiración, de contracción muscular y de transmisión nerviosa se reducen también a sus bases moleculares. Estos mecanismos enzimáticos y electrónicos muy precisos son los que permiten sacar la energía contenida en la luz o en los enlaces químicos, almacenarla y transmitirla de unas moléculas a otras. La Biología ancla sus raíces en el mundo físico, y con ello se integra de lleno y entra en la misma lógica que las demás ciencias naturales: es el triunfo del enfoque materialista o mecanicista como postulado a finales del siglo XIX.

Información

El análisis reduccionista ha llegado a sus límites en las Ciencias Biológicas. ¿Ha entrado la Biología con ello en un período académico? En el enfoque del biólogo actual caben dos posturas intelectuales —y de hecho ambas se dan. La complejidad orgánica estructural y funcional puede ser una consecuencia estadística de efecto aditivo de las moléculas que la configuran, y por lo tanto lo que queda por conocer consiste en su descripción en estos términos. Alternativamente, existen leyes propias y diferentes lenguajes biológicos según los niveles de complejidad, y el problema consiste en saber cómo se han generado y cómo se mantienen.

Precisamente, lo que los descubrimientos de la Biología molecular nos han enseñado es que las propiedades de una molécula y su función en un proceso no son directamente predecibles del conocimiento estructural de esa molécula. Es decir, sus propiedades no están descritas en la composición, o estructura, o energía de enlace de esta molécula. Así, en los mecanismos de expresión génica, del conocimiento por separado de los cuatro tipos de nucleótidos no se puede predecir su función en la molécula del ADN; del inventario detallado de los elementos que participan en la expresión génica no se puede inferir cómo interactúan en este proceso; ni de la estructura de una proteína, su particular función enzimática. Los diferentes niveles se generan por una transformación o traducción de la información: de la contenida en la secuencia de nucleótidos a la información contenida en la secuencia de aminoácidos; a su vez, esta secuencia configura su estructura terciaria y de ahí se genera una nueva información: su función como proteína

estructural o enzimática. El flujo de información va de abajo a arriba, pero su comprensión sólo es posible desde arriba. Dicho de otra manera, las propiedades de cada nivel de organización se pueden explicar en términos de las propiedades de los elementos del nivel inferior, pero del conocimiento de estos últimos no se pueden inferir las propiedades de su interacción. Esto se debe fundamentalmente a que: a) no todos los elementos posibles de un nivel participan en el siguiente, b) de su interacción se crea un tipo de información nueva, y c) esa información ha estado expuesta a lo largo de la evolución a selección, y por lo tanto tiene además una lógica histórica.

Por estas razones, el biólogo actual cree en la existencia de jerarquías de organización, que cada nivel tiene un lenguaje propio y que entre ellos hay una discontinuidad salvada por un flujo de información que va de abajo arriba. Lo que él intenta es entender estos lenguajes para ver cómo se generan. El enfoque de la Biología actual es, pues, integrista. La envergadura del esfuerzo queda clara con sólo enumerar algunos niveles de organización estructural: átomo-molécula-organela-células-tejidos y órganos-sistemas de órganos-especies-sistemas ecológicos. Quizás el esfuerzo se vea facilitado por una serie de propiedades o principios posiblemente comunes a los diferentes niveles. La Biología molecular encontró: 1) que en procesos aparentemente complejos intervienen de hecho un número finito y relativamente pequeño de moléculas; 2) que una gran riqueza de información se puede generar por la repetición de pocos elementos con efectos combinatoriales, como en el ADN y en la proteínas; 3) que las propiedades estructurales de los elementos definen directamente su asociación (ensamblaje) espontánea en estructuras complejas; y 4) que todas las interacciones se realizan con un mínimo de energía libre. La estructura tridimensional de una proteína, y de ahí su función, está definida en la secuencia de sus aminoácidos. El mismo principio rige la formación de complejos supramoleculares, como en la construcción de las cubiertas protéicas de los virus y en el ensamblaje de membranas celulares y de fibras musculares. Estas propiedades parecen ser válidas aun a niveles de mayor complejidad. Así, el número de genes, es decir, de funciones, no es muy diferente entre una bacteria y un organismo multicelular, como un anélido o una mosca y muy posiblemente un vertebrado. Es posible que la complejidad creciente que observamos en la evolución no se haya generado por adición de funciones, si-

no por la aparición de combinatorias nuevas. En organismos multicelulares hay pocos tipos celulares distintos, pero éstos aparecen repetidos en tejidos y metaméricamente en segmentos. El mismo sistema nervioso parece estar también construido con el mismo principio de interacción de estructuras. ¿Hasta qué punto la organización en sistemas celulares resulta directamente de las propiedades, definidas genéticamente, en los elementos celulares?

Estas propiedades sugieren la existencia de unos principios, pero no sabemos cómo estos se ejecutan ni cómo se generan a niveles supramoleculares. Durante el desarrollo de los organismos multicelulares, la morfogénesis va asociada a la aparición de tipos celulares distintos, en determinados momentos y posiciones relativas fijas. La diferenciación de estas células tiene su base en el mecanismo de regulación de actividad génica, resultado de interacción entre moléculas y el ADN. Podemos entender molecularmente la diferenciación celular, pero no la ordenación de células en conjuntos finitos en tamaño y forma. ¿Cómo la información genética contenida dentro de las células controla la ordenación de éstas en sistemas supracelulares? El funcionamiento del sistema nervioso puede ser una consecuencia de cómo está construido durante su desarrollo; pero ¿cuáles son las reglas de esta construcción?, ¿qué relación hay entre su organización y la existencia de reflejos, de instinto, de memoria, de selección consciente de señales? Este aumento de complejidad de funciones, ¿ha requerido nuevas estructuras, nuevas leyes de organización?

La cantidad de variabilidad hereditaria de cualquier población es suficiente para que la selección natural pueda elegir combinaciones génicas más favorables, pero no se sabe cuál de estas variables es realmente relevante, ni qué significa favorable, ni cuál es la variabilidad que permite segregar especies, etc. Es posible de nuevo que, cuando se entienda cómo los genes controlan el desarrollo, podamos explicarnos qué factores hereditarios son los que intervienen fundamentalmente en la creación de especies y formas nuevas. Es indudable que estos problemas podrán reducirse finalmente a términos moleculares, pero es muy probable que sólo cierta combinación de moléculas y ciertas interacciones de sistemas, en el conjunto de las posibles, sean las que hayan sido utilizadas por la evolución para levantar el impresionante mundo orgánico. El entender cuáles y cómo es el objetivo del biólogo en nuestros días.