

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

INSTITUTO DE FILOSOFÍA Y LETRAS

UNA RECONSTRUCCIÓN ESTRUCTURAL, UNA
REORGANIZACIÓN DE LA INTELIGENCIA DEL
DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA
DEL ADN

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

POSGRUADO EN FILOSOFÍA

PRESENTA:

ALBERTO RAMÍREZ FERRERAS

INSTITUTO DE FILOSOFÍA Y LETRAS



INSTITUTO DE FILOSOFÍA Y LETRAS
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

MÉXICO, D. F.





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

INSTITUTO DE QUIMICA

LABORATORIO DE QUIMICA ORGANICA

QUIMICA ORGANICA

QUIMICA ORGANICA

THE UNIVERSITY OF CHICAGO
LIBRARY

INDICE

A manera de introducción.....	1
Capítulo 1	
La noción de paradigma.....	8
La idea de comunidad científica.....	25
La ciencia normal.....	30
La crisis.....	36
Revolución científica.....	42
La comparación como conversión.....	53
Capítulo 2	
El fenómeno de la herencia y la idea de la sustancia genética.....	59
La sustancia genética como sustancia macromolecular.....	63
La sustancia genética como proteína.....	69
La resistencia a considerar el ADN como sustancia genética.....	75
La identificación de la sustancia transformadora.....	79
El experimento Hershey-Chase.....	84
La estructura como recurso para identificar la sustancia genética...	87
La cristalografía y la difracción helicoidal.....	90
Estereoquímica y la búsqueda de la estructura del ADN.....	98
El modelo de Pauling y su impacto en Watson y Crick.....	106
El grupo fago.....	111
Las seis semanas en las que se determinó la estructura del ADN.....	115
Capítulo 3	
Una microrevolución en la biología molecular.....	126
El paradigma de la proteína como sustancia genética.....	131
Una anomalía y una crisis en la biología molecular.....	139
La superación de una crisis.....	145
El modelo de la doble hélice y la culminación de una revolución.....	151
Como conclusión.....	158
Bibliografía.....	170

A MANERA DE INTRODUCCION

Por dondequiera que dirijamos nuestra mirada, el cambio se hace presente con tal evidencia que, desde tiempos remotos, ha sido uno de los fenómenos que más ha atraído la atención del hombre. Es por ello que, en todo momento, el hombre se ha preocupado por entenderlo, por comprender todos y cada uno de sus aspectos. Es tal la cautivación del cambio que, en mayor o menor medida, la mayoría de las ciencias ha tenido que ver, en sus respectivos objetos de estudio, con alguna forma específica de él.

El cambio, pues, es un fenómeno tan común que la propia ciencia está inmersa en un proceso dinámico de cambio. No hace falta profundizar en la historia de la ciencia para darse cuenta de que ésta está en un proceso de cambio constante, de que la ciencia de nuestros tiempos es diferente a la ciencia de hace algunos años o siglos. Ante este hecho, la filosofía de la ciencia no es la excepción a aquellas disciplinas que tienen que ver de alguna u otra manera con el cambio en sus objetos de estudio. A partir de los años sesenta, el estudio del cambio científico ha ido desplazando el viejo interés por estudiar el método científico (al cual se le ha considerado como un conjunto de reglas que debe presidir, en cualquier momento histórico, a cualquier trabajo científico), al grado que hoy en día, sin duda alguna, el aspecto más relevante de la ciencia, para los actuales filósofos de la ciencia, es precisamente el del cambio científico.

Y no es que antes de los años sesenta el tema del cambio en la ciencia haya estado ausente de la filosofía, sino que se trataba de formas de cambio que no implicaban mayor dificultad en su comprensión y que, por lo tanto, no

requerían mayor atención por parte de los filósofos de la ciencia. No es sino hasta que se pone en tela de juicio la inalterabilidad de los principios del método científico que una forma de cambio hasta entonces insospechada empieza aparecer ante los ojos del filósofo. A diferencia del cambio acumulativo, al cual se le considera un proceso en el que, día a día, se suman a los conocimientos ya establecidos nuevos conocimientos, el cambio de los principios que guían el trabajo científico —que se suponía deberían ser los mismos en cualquier época y en cualquier ciencia— vino a conmocionar al campo de la filosofía de la ciencia. No sólo porque se trataba de una nueva forma de cambio, sino porque se trata de una forma aún más compleja que la del proceso acumulativo, que requiere de un esfuerzo intelectual extra para su comprensión.

Desde los años sesenta han sido varios los pensadores que han encausado sus talentos a la dilucidación y comprensión de esta forma de cambio en la ciencia, cada uno de los cuales ha propuesto un modelo que pretende explicar la manera cómo se sustituyen los marcos teóricos en los que se basa la práctica científica en una determinada época. Entre estos pensadores se encuentra Tomás Kuhn, quién con su obra "La estructura de las revoluciones científicas" se ha consagrado como uno de los pioneros a este respecto. La influencia que ha ejercido esta obra en un vasto número de pensadores y la controversia que ha desatado obligan a no pasar desapercibido el modelo del cambio científico de Kuhn y, mas aún, valorar su alcance histórico, esto es, determinar hasta qué grado es posible reconstruir la historia de la ciencia apoyándose en dicho modelo. Sin duda hacer un análisis exhaustivo del modelo de Kuhn para el cambio científico sería una labor demasiado complicada, no sólo porque hay una vasta bibliografía de Kuhn a este respecto, sino porque de seguro dicho modelo se ha visto enriquecido con nuevas ideas a partir de "La estructura de las revoluciones científicas". Son estas dos dificultades

las que nos limitan a abordar el modelo de cambio científico kuhniano desde la perspectiva de tres obras: 1) La estructura de las revoluciones científicas, 2) La tensión esencial y 3) La posdata de 1969. Aún así una exposición completa de la teoría del cambio científico que se presenta en estas obras parece una labor complicada dada la gran constelación de conceptos o categorías que ahí aparece. Por tal razón nos limitaremos a tomar e intentar describir algunos de los conceptos medulares ahí presentes, aquellos que nos permitan describir de una manera general el modelo plasmado en dichas obras. Por lo que se refiere a la valoración de la capacidad que tiene el modelo para reconstruir la historia de la ciencia en cada uno de sus episodios, es un tanto difícil emitir un juicio definitivo acerca de si es apropiado o no dicho modelo para comprender el cambio científico. La capacidad o incapacidad que tenga el modelo de Kuhn para reconstruir uno de los casos históricos de cambio científico nunca podrá ser una prueba definitiva a favor o en contra de éste, pero sí uno de sus respaldos o descréditos. Es por ello que, en el presente trabajo, intentaremos reconstruir el episodio que hizo de la biología molecular una ciencia experimental, esto es, el momento en el que aparece el modelo de la doble hélice para la estructura del ADN, modelo que desanimó a seguir considerando a la proteína como sustancia genética. Aunque éste podría considerarse un trabajo histórico, su rasgo fundamental es filosófico, esto es, evaluar el modelo del cambio científico de Kuhn como una propuesta filosófica para comprender el desarrollo de la ciencia.

Generalmente Kuhn, en su preparación como físico, recurre constantemente a esta ciencia para ejemplificar su modelo de cambio científico. Por ello, el modelo de cambio científico de Kuhn podría parecer limitado. Probablemente el modelo de Kuhn no logre explicar todos y cada uno de los episodios de la historia de la ciencia que tienen que ver con el cambio científico, sin

embargo, ello no significa que dicho modelo no logre explicar este proceso de cambio suscitado en otras ciencias que no sean la física. El modelo de Kuhn, como intentaremos demostrar a lo largo de este trabajo, sale exitoso al explicar el cambio científico que se suscitó en la biología molecular con el modelo de la doble hélice de James Watson y Francis Crick para la estructura del ADN, es decir, este acontecimiento puede verse, en efecto, como una microrevolución científica, esto es, una revolución que se circunscribió a transformar a una sola disciplina científica.

Dado que, en este trabajo, se pretende aplicar el modelo de Kuhn a un acontecimiento tan influyente en el desarrollo ulterior de la biología molecular, como es el caso del descubrimiento de la estructura del ADN, es imprescindible destacar las principales categorías de dicho modelo, aquellas que permitan tener un cuadro de lo qué es el cambio científico según Kuhn. En el primer capítulo, a través de sus diferentes secciones, intentaremos hacer una presentación de la que podría considerarse una de las principales ideas aportadas por Kuhn a la filosofía de la ciencia, la idea de la revolución científica. Las diferentes categorías que se abordan en cada una de las secciones del primer capítulo, han sido elegidas no sólo porque aparezcan dentro de "La estructura de las revoluciones científicas", sino porque Kuhn ha dispuesto, en realidad, de ellas para aclarar su concepto de "revolución científica". El objetivo central del primer capítulo, pues, es el de destacar la categoría de revolución científica como columna vertebral del modelo kuhneano de cambio científico.

Para poder establecer si el modelo de Kuhn es capaz o no de explicar el descubrimiento de la estructura del ADN como una revolución científica, es necesario hacer una comparación entre una reconstrucción histórica de este episodio de la biología molecular, que describa, en la medida de lo posible, este evento científico tal y como lo presentan los historiadores que hemos

consultado, y una reconstrucción histórica de este mismo evento bajo la óptica del modelo kuhneano. En el segundo capítulo de este trabajo intentaremos presentar la versión histórica del descubrimiento de la estructura del ADN. Nuestro objetivo, en este capítulo, es intentar presentar algunos de los factores técnicos o teóricos que hicieron posible que Watson y Crick desarrollaran su modelo de la doble hélice para la estructura del ADN. Intentaremos, además, describir el ambiente que prevalecía dentro de la biología molecular antes y durante el trabajo de Watson y Crick. El modelo de la doble hélice de Watson y Crick no es un trabajo espontáneo dentro de la biología molecular, sino que responde a una inquietud que caracterizó el espíritu de los científicos de esta disciplina desde la década de los treinta, que era el afán por determinar la identidad de la sustancia genética, esto es, establecer qué sustancia era responsable de las funciones genéticas que se le atribuían al gen. A este respecto, intentaremos describir el camino repleto de obstáculos que se hubo de recorrer para determinar que el ADN era la sustancia genética, en el que el modelo de la doble hélice jugó un papel decisivo. Cada una de las secciones del segundo capítulo intenta presentar un tramo del camino que conduce hacia la doble hélice y, mediante ésta, hacia la identidad de la sustancia genética como ADN.

En el tercer y último capítulo intentaremos, a manera de síntesis, conjugar el primero y segundo capítulo en una reconstrucción histórica del descubrimiento de la estructura del ADN bajo la perspectiva del modelo kuhneano de cambio científico. En este capítulo aplicaremos las categorías del modelo de kuhn, que se analizan en el primer capítulo, al proceso de identificación de la sustancia genética como ADN que se describirá en el segundo capítulo. En este tercer capítulo, nuestro eje es presentar el modelo de la doble hélice como parte de un proceso revolucionario en el que se

sustituye, dentro de la biología molecular, el paradigma de la proteína como sustancia genética por el paradigma del ADN como sustancia genética. Aunque el trabajo de Watson y Crick se pueda considerar como la etapa culminante del proceso revolucionario, no es la única. Es por ello que, en este mismo capítulo, intentaremos identificar, en el proceso de identificación de la sustancia genética como ADN, otras etapas del proceso revolucionario que permitan justificar el papel revolucionario que tuvo el modelo de la doble hélice de Watson y Crick en la biología molecular.

La tesis que sustenta este trabajo se encuentra propiamente en el tercer capítulo y puede enunciarse en los siguientes términos: De acuerdo al modelo de Kuhn, el modelo de la doble hélice es un trabajo que vino a resolver a favor del paradigma del ADN como sustancia genética la disputa entre éste y el paradigma de la proteína como sustancia genética. Es decir, el modelo de Kuhn permite reconstruir el proceso que conduce al descubrimiento de la estructura del ADN como una revolución científica dentro de la biología molecular, es decir, como una microrevolución. Al sustentar esta tesis, consideramos que el modelo de Kuhn puede explicar el cambio científico que se ha suscitado en otras disciplinas que no sean la física.

CAPITULO 1

LA NOCION DE PARADIGMA

Dentro de la teoría kuhniana de cambio científico una de las nociones fundamentales es la de paradigma. La relevancia de ésta radica en ser, por decirlo de alguna manera, la esencia misma de los cambios revolucionarios que, de acuerdo al punto de vista de Kuhn, se han suscitado en la ciencia o en las diferentes ciencias específicas. Esto es, en esencia, las revoluciones científicas no son más que un proceso mediante el que una comunidad científica sustituye un paradigma por otro. Y más aun porque al interior del propio paradigma se gestan las condiciones que hacen posible el cambio revolucionario o, como lo indica Margaret Masterman al comentar a Kuhn, "el surgimiento de una anomalía que lo sumerge en una crisis (Lakatos y Musgrave, La crítica y el desarrollo del conocimiento, ed. Grijalbo, Barcelona 1975 pág. 189).

Siendo la noción de "paradigma" fundamental en la explicación del tema que, de alguna u otra manera, da título a la Estructura de las Revoluciones Científicas, ¿por qué es que Kuhn usa dicho término en diferentes sentidos? Bien pareciera que Kuhn se contradiciera cada vez que, a lo largo de su exposición de lo qué es el paradigma, agrega un nuevo sentido al término; sin embargo, lo que en realidad hace es mencionar las diversas características que, de acuerdo a su perspectiva, posee el paradigma. En su exposición de lo qué es el paradigma, Kuhn en ningún momento pretende definirlo; sino más bien caracterizar sus diversos aspectos. De entrada, en Kuhn, el paradigma es una entidad compleja, compuesta por todos aquellos aspectos que han de

mencionarse e irreductible a uno de ellos, por muy esencial que pudiera parecer cualquiera de ellos.

Antes de cualquier cosa que pudiera decirse del paradigma kuhniano, esto es, antes de describir algunos de sus diferentes aspectos, habrá que señalar que, para Kuhn, el paradigma no es una mera idea que sólo se encuentre en su mente. Para Kuhn, el paradigma es un componente real de la ciencia, algo que se da en efecto en la actividad científica. De este modo, el paradigma, en todos y cada uno de sus aspectos, es una entidad real de la ciencia. Es decir, para Kuhn, cada uno de los aspectos del paradigma es algo dado. Ya sea que se trate de la "concreta solución de problemas" o de la "forma de ver", todos los aspectos paradigmáticos poseen una presencia real en el paradigma. Tanto el paradigma, como totalidad, como cada uno de sus aspectos, como partes del todo, están dados en la ciencia.

Aun cuando en el paradigma kuhniano se da una vasta gama de aspectos, que van desde los más tangibles, como pudiera ser el libro de texto, hasta los menos intangibles, como pudieran ser las creencias o ideas que lo constituyen, unos y otros no sólo forman parte del ser del paradigma, sino que además de las funciones que éste tenga. Podría decirse que, en Kuhn, el paradigma existe por cada uno de sus aspectos; de igual modo que el cuerpo humano existe porque existe cada uno de sus órganos. El paradigma kuhniano, desde esta perspectiva, no sólo es una suma de sus aspectos, es también la conjunción de todos ellos, esto es, lo que hace cada uno para lo demás y, en ello, para el todo. En este sentido, el paradigma kuhniano de ningún modo es una entidad petrificada, sino al contrario una entidad viva o dinámica, capaz de inducir movimiento a la ciencia. Como aspecto real de la ciencia, el paradigma no sólo es un engrane mas en el sofisticado mecanismo de la

ciencia. Es la pieza de la que, más que ninguna otra, dimana el dinamismo de la ciencia.

En suma, el paradigma kuhniano es una entidad compleja y dinámica, en la que sus diversos aspectos, lejos de estar aislados unos de los otros, se encuentran en una franca interacción, como es el caso de los dos aspectos que abordaremos en la presente sección. Bien parece que la complejidad de lo que Kuhn ve como paradigma, en este caso, lo conduce a dar diferentes significados, a lo largo de su texto de 1962, de paradigma. Más aun, quizá la conjunción de todos esos aspectos que caracterizan de manera diferente al paradigma en diferentes fragmentos de su texto, sea, si al caso tiene, la esencia misma de éste, lo que lo hace distinto de cualquier otro aspecto de la ciencia. No es que en cada uno de los aspectos del paradigma haya un paradigma, sino tan solo una característica más del paradigma.

Aun cuando el paradigma, con todos sus aspectos, sea fundamental en la comprensión de las revoluciones científicas, hay dos aspectos que nos parecen de gran utilidad para la explicación de las revoluciones científicas -vistas éstas como un proceso de transición de un paradigma a otro-, a saber, 1) el aspecto del paradigma como concreta solución de problemas, y 2) el aspecto del paradigma como forma de ver. Con ello no pretendo, de ningún modo, reducir al paradigma a uno o ambos aspectos. Así como recurriremos a estos dos aspectos para explicar la noción de revolución científica en Kuhn, podríamos recurrir, en subsecuentes secciones, a otros aspectos de éste para explicar otras nociones de la teoría kuhniana del cambio científico. Además de encontrar en estos dos aspectos una premisa imprescindible en la explicación de la revolución científica, hay otra razón por la que hemos decidido analizar la noción de paradigma bajo éstos. En su Posdata de 1969, Kuhn destaca a la "concreta solución de problemas" como aquello a lo que

originalmente aplicó el término paradigma" (Kuhn Tomas, "Posdata" en La estructura de las revoluciones científicas, ed., Fondo de Cultura Económica, México 1975, pág. 286). Sin duda, este señalamiento del propio Kuhn, de alguna u otra manera, muestra cuán tan importante es, para él, este aspecto en la constelación de compromisos que constituyen al paradigma. Podría analizarse la relación que hay entre este aspecto y cualquier otro del paradigma para explicar su dinamismo, sin embargo, en tanto que he considerado a la forma de ver como un aspecto mas que facilita la comprensión de la noción de revolución científica en Kuhn, centraremos el análisis a la relación entre estos dos aspectos.

Antes de iniciar el análisis de los dos aspectos con los que pretendo describir cómo es que, en Kuhn, el paradigma es una entidad compleja y dinámica —que parece ser la noción fundamental que subyace detrás de todas las caracterizaciones que este pensador hace del paradigma—, quisiera precisar el significado de dos términos que usaré para tal propósito (el significado que preciso para estos términos son propios y, de ningún manera se debe considerar como si fueran significados que Kuhn atribuya a estos términos): 1) objetivo y 2) subjetivo. En el presente trabajo, entiendo por objetivo aquello que se encuentra dado fuera del sujeto, y por subjetivo aquello que sólo se encuentra dado dentro del sujeto. En este sentido, las ondulaciones de las capas de aire son algo objetivo, en tanto que el sonido es algo subjetivo. Así como las ondulaciones de las capas de aire no están dentro del sujeto, esto es, más adentro de su órgano receptor de las ondulaciones del aire; el sonido no se encuentra fuera de éste. Sin embargo, aunque el sonido no exista fuera del sujeto, ello no significa que el sonido no exista; existe en y para el sujeto. Ahora bien, aunque el sonido no son las ondulaciones del aire, éstas determinan a aquél mediante un proceso que

podría llamarse subjetivación. En este proceso de subjetivación, la energía contenida en las ondas sonoras se transforman en impulsos eléctricos que viajan al sistema nervioso central donde se codifican como sonido. Así como lo objetivo se puede subjetivar en imágenes, sonidos, olores, texturas y sabores (e incluso en ideas); lo subjetivo también podría objetivarse. Cualquier utensilio o instrumento del que haga uso el hombre es la realización de una idea, esto es, una idea que toma cuerpo o se objetiva. Entre lo objetivo y lo subjetivo no existe un abismo que los separe.

En el prefacio a la Estructura de las Revoluciones Científicas, Kuhn, en una de sus primeras caracterizaciones de lo qué es o son los paradigmas, asevera que éstos son "realizaciones científicas universalmente reconocidas que, durante cierto tiempo, proveen de modelos de problemas y de soluciones a una comunidad científica" (Kuhn Tomas, La estructura de las revoluciones científicas, ed. Fondo de Cultura Económica, México 1995, pág. 13). En esta caracterización, más que ninguna otra, se aprecia claramente que para Kuhn el paradigma es algo que ha llegado a ser o un ser algo. Sin embargo, aunque una comunidad científica lo reconozca como un ser algo, ello no implica que sea algo meramente objetivo. No sólo lo objetivo puede ser objeto de reconocimiento, sino también lo subjetivo. Así como dos individuos o más pueden reconocer que el fuego es algo que quema, podrían reconocer que la sensación que produce en cada uno de ellos cuando acercan su mano a él es similar. Si en esta caracterización no hay indicio del modo de ser del paradigma, es porque para Kuhn los aspectos del paradigma pueden ser de naturaleza objetiva o subjetiva —esto es, de una u otra, o ambas—, entre los que existen determinadas relaciones. Por ejemplo, en el libro de texto, que es un elemento paradigmático, se dan aspectos de ambas naturalezas. Por un lado contiene signos o términos que cualquiera puede observar al abrir sus

páginas, pues éstas se encuentran dadas o inscritas en ellas. Y, por otro lado, posee ideas que se encuentran latentes en las combinaciones de los términos, ideas que no se manifiestan mientras no haya alguien que además de abrir sus páginas, lea y comprenda, en base a un lenguaje que comparte con quien escribió o tradujo el texto en cuestión. Los signos inscritos en las páginas de un libro de texto, suscitan en el lector ideas. Un libro de texto no es libro de texto si está en blanco o si no hay quien lo lea o lo comprenda. Para que el libro de texto tenga sentido como tal, se requiere, pues, que su parte objetiva y subjetiva se conjuguen. Es quizá por esta razón que no cualquiera que abra un libro de texto es o puede hacerse miembro de una comunidad científica.

Dos aspectos del paradigma que se encuentran íntimamente relacionados entre sí, cada uno de los cuales al parecer posee, en grado diferente, tanto naturaleza objetiva como subjetiva, son "el de la concreta solución de problemas y el de la forma de ver". Al comentar uno de los sentidos, entre los 23 que encuentra en la Estructura de las Revoluciones Científicas, Margaret Masterman indica que el paradigma, para Kuhn, "es un artefacto, cuya función principal es la de solucionar enigmas" (Lakatos y Musgrave, Op. cit. pág. 175). Este artefacto al que se refiere Masterman no es otra cosa mas que esa concreta solución de problemas a la que originalmente Kuhn aplicó el término paradigma. En efecto, la concreta solución de problemas es un instrumento del que se echa mano al solucionar enigmas. Al caracterizar como concreta a una determinada solución de problemas, lo que Kuhn hace es remarcar una ligera diferencia que hay entre solución y solucionar. Mientras la primera se refiere un tanto a la acción consumada; la segunda se refiere exclusivamente a la acción en su ejercicio. En este sentido, el solucionar un problema es estar en busca de una explicación o respuesta a dicho problema;

en tanto la solución de un problema es estar en posesión de una explicación o respuesta a tal problema. En otros términos, solucionar es la acción por la que se está solucionando un problema, en tanto que solución es haber solucionado un problema. Bien parece, desde esta perspectiva, que al caracterizar como concreta a una solución de problemas, lo que Kuhn pretende dejar en claro es que el paradigma cuenta con una acción o serie de acciones que han logrado el propósito por el cual han sido ejercidas y que pudieran ejercerse nuevamente al solucionar nuevos problemas. La concreta solución de problemas es, pues, una serie de operaciones que han mostrado su eficacia al resolver problemas y que, por lo tanto, ha quedado establecido como tal, esto es, como un camino que ha quedado trazado y que conduce a la respuesta de un problema planteado. Al contar con una concreta solución de problemas, los científicos no intentan o ensayan, al menos durante la ciencia normal, maneras de solucionar enigmas, sino que siguen una manera que ya ha mostrado su eficacia. De este modo, el paradigma, al menos como concreta solución de problemas, es, en efecto, algo con lo que cuenta el científico, una herramienta que se encuentra en su caja de herramientas, aguardando ahí a ser utilizada en cualquier momento que así lo requiera el científico. Mientras cuente con esa herramienta, el científico no estará en busca de alguna otra que realice la misma función.

Aunque el razonar es fundamentalmente una actividad subjetiva, puede objetivarse en el discurso oral o escrito, por la manera en que son dispuestas las palabras o los demás recursos de expresión de ideas (tales como gráficas e ilustraciones, etc.). Si el razonar es parte de la concreta solución de problemas, éste se puede encontrar objetivado en los libros de texto que difunden a un paradigma. Pero el científico no sólo razona, sino que además realiza otras operaciones que son evidentemente objetivas, aun

cuando sean también una objetivación de ideas o razonamientos, tales como construir y manipular instrumentos de observación, planear y llevar a cabo experimentos, obtener y organizar datos, etc...Todas estas operaciones se encuentran objetivamente dadas en el trabajo del científico. La concreta solución de problemas es objetiva en tanto que, si vemos al científico trabajar, pueden ser perceptibles las actividades que la constituyen.

Es precisamente porque esta concreta solución de problemas se encuentra, de alguna u otra manera, objetivada que los estudiantes de ciencia pueden entrar en contacto con ella, ya sea mediante la lectura del libro de texto que la contiene o ya sea, sobre todo, por el uso que hace de ella el maestro durante su enseñanza, esto es, cuando los estudiantes de ciencia, al estar dentro del aula o laboratorio de prácticas, presencian cuando su maestro desarrolla la concreta solución de problemas que han de aprender.

Sin embargo, no es leyendo o viendo cómo corre un corredor como ejercita uno su cuerpo. De igual modo, no sólo leyendo en el libro de texto o viendo a su maestro trabajar es cómo el estudiante de ciencia se ejercita y aprende la concreta solución de problemas que ha de aplicar durante su desempeño profesional. De modo que, sólo cuando se realizan la serie de operaciones que conforman a la concreta solución de problemas, es cuando se está en un pleno contacto con ésta y se está en condiciones de aprenderlo. En este sentido, el paradigma, como concreta solución de problemas, es sustancialmente una forma de operar que tiene la ciencia en un momento determinado. Una forma de operar que está dada en la solución de problemas a los que se enfrenta el estudiante de una ciencia durante su preparación o educación; forma de operar que soluciona efectivamente esos problemas, o mejor aún, una manera de solucionar problemas que ha mostrado su eficacia.

Esta específica forma de solucionar problemas, que está dada como solución de los problemas ejemplares, se subjetiva durante el proceso de educación del científico; no sólo como una capacidad de realizar las operaciones que conforman a la concreta solución de problemas, sino además como una forma de ver. En su sentido más profundo, el aprendizaje es un proceso mediante el cual se asimila o hace propio lo conocido; de tal modo que la educación, al ser formativa o informativa, provee de estructuras cognoscitivas al futuro profesional o científico. En el proceso educativo, el paradigma, en tanto que es lo que ha de aprender el estudiante de ciencia, es una objetiva o dada forma de solucionar problemas y, en tanto que asimilado o aprehendido, es la capacidad de solucionar problemas y una forma de ver.

Si bien el paradigma, como una forma de ver, está relacionado con un ver algo ahí y ahora que ningún otro que no esté educado dentro de ese paradigma pueda ver, es decir, el ver determinadas imágenes; no parece que, en Kuhn, la forma de ver se reduzca a las imágenes que se ven. Estas imágenes son tan sólo una construcción que proviene de una determinada manera de procesar el estímulo. Esta manera de procesar el estímulo, más que las imágenes que se ven, es a lo que Kuhn pareciera llamar forma de ver. De ahí que la explicación que ofrece Kuhn respecto al proceso que media entre el estímulo y la sensación no sea gratuita (Cfr. Kuhn T., La tensión esencial, ed. F.C.E., México 1976, págs. 332-334). Al hablar de los procesos neurales que se suscitan entre el momento en que se hace recepción del estímulo y el momento que se hace conciencia de una sensación, Kuhn deja entrever la posibilidad de que el estímulo pueda ser procesado de diferentes maneras, cada una de las cuales sería una forma distinta de ver y a cada una de las cuales le corresponderían imágenes distintas como sus construcciones. Asociado a esos mecanismos neurales, el paradigma, como forma de ver, es una manera

específica de procesar el estímulo; lo cual conlleva a que, todo aquél que lo haya aprehendido, cuente, como dice Kuhn, "con el mismo dato" (Ibid, pág. 333). De este modo, si lo que se ve no es el estímulo, sino el dato, los que han aprehendido el paradigma han aprehendido a ver el mismo dato, a procesar de igual modo el estímulo. De modo que sólo ellos pueden ver ahí y ahora lo que los otros que no lo han aprehendido no pueden ver. Por las imágenes que se llegan a ver, el paradigma, como forma de ver, posee una naturaleza subjetiva; es decir, al paradigma le son inherentes determinadas imágenes del objeto que sólo pueden ser vistas por quienes son seguidores de él.

Aunque las imágenes son intangibles y, por ello, parecieran no estar en ningún lado, en Kuhn, al parecer, están asociadas a la función de determinados sistemas neurales. Si Kuhn habla de sistemas neurales, asociados al procesamiento del estímulo y a la construcción del dato, es porque de alguna u otra manera considera que este es el sustrato material en el que queda asimilado o grabado el paradigma durante la educación del estudiante de ciencia. Aun cuando la forma de ver, en Kuhn, está asociada con un sistema neural (o con determinadas sinapsis), es un tanto aventurero afirmar que ella se reduzca a un sistema neural específico, esto es, que todos lo que ven de esa forma tengan la misma cantidad de neuronas y de sinapsis como un sistema único de procesamiento del estímulo. Por lo tanto, de ninguna manera es de esperar que, si se observara la zona del cerebro especializada en la codificación de los estímulos visuales, una configuración de sinapsis específica sea identificada como el paradigma en cuanto forma de ver. El procesamiento del estímulo y la construcción del dato o las imágenes que se ven, en Kuhn, no se dan en la nada, sino, por el contrario, en sistemas neurales que si bien no se pueden ubicar y precisar en su configuración, ello no implica que no estén dados en el cerebro. De ningún modo, pues, Kuhn

pretende presentar a los sistemas neurales como un aspecto del paradigma (es decir, que pretenda afirmar que el paradigma sea un sistema neural específico); sin embargo, como físico que pretende entender un proceso a partir de entidades físicas, Kuhn no puede del todo hacer a un lado a estos sistemas neurales como parte de la explicación de la forma de ver o, más extensamente, como parte de la explicación de la manera cómo opera el paradigma. Si bien en Kuhn el paradigma no es un sistema neural, tiene que ver con la manera en que éste procesa el estímulo y construye el dato.

Al hablar de estímulos y sistemas neurales, Kuhn aborda el aspecto más profundo y oscuro de la manera cómo opera, esto es, un aspecto que es "previo tanto lógicamente como psicológicamente a cualquiera de los numerosos criterios conforme a los que opera el paradigma" (Ibidem, pág. 332). Se trata de un proceso del cual el científico no es consciente lógicamente o psicológicamente, al que Kuhn llama percepción de similitud y caracteriza como "la principal capacidad que adquieren los estudiantes al resolver problemas, por medio de la cual se reconocen las semejanzas autorizadas por el grupo" (Ibidem, pág. 330). Con el ejemplo de un niño que aprende a distinguir, por medio de la ostensión, gansos, cisnes y patos, Kuhn explica cómo dicha capacidad queda grabada o programada en el sistema neural del científico. A este respecto, en alusión a su ejemplo, señala que "durante el paseo, se ha reprogramado parte del mecanismo neural por el cual el niño procesa estímulos visuales, y se han modificado los datos que recibe de los estímulos que antes le hacían evocar aves" (Ibidem, pág. 334). El punto es que este programa neural, en el que ha quedado grabada la capacidad del científico para reconocer las semejanzas autorizadas por el grupo, opera sin necesidad de recurrir a reglas; de ahí que afirma que sea "previa tanto lógicamente como psicológicamente a cualquiera de los numerosos criterios conforme a los cuales habría hecho esa misma

identificación de la similitud" (Ibidem, pág. 332). De este modo, aunque las operaciones o procedimientos que realiza el científico al resolver nuevos problemas que corresponden a una clase de problemas que ha aprendido a resolver conllevan determinadas reglas, no es necesario que éste las tenga presentes conscientemente al momento de actuar. O como dice Kuhn: "Después de captada la similitud, puede uno inquirir sobre los criterios, y a menudo vale la pena hacerlos. Pero en realidad no es necesario. Puede aplicarse directamente la predisposición mental o visual adquirida al aprender a ver semejanzas dos problemas" (Idem). Esto, sin embargo, no significa que detrás de la forma de proceder del científico no halla reglas que correspondan al paradigma por el que se guía en su trabajo; pues, aunque esta capacidad para procesar el estímulo y construir, de ahí, el mismo dato o identificar semejanzas no es esencialmente una regla, podría formalizarse en reglas. Para Kuhn, el científico procede en sus labores de acuerdo al paradigma que ha aprehendido, aun cuando no tenga presente conscientemente las reglas de éste. El hombre de ciencia sin pensar lo que debe hacer, esto es, sin consultar la regla que se supone ha de consultar, hace lo que ha aprehendido a hacer durante su educación.

Durante su educación, el científico se encuentra ante una serie de problemas que son ejemplares dentro de la disciplina en que se adiestra, esto es, situaciones que, aunque ya están previamente aclaradas o resueltas, se le presentan como problemáticas por desconocer, al momento de su educación, la manera de solucionarlas. Estos problemas son ejemplares por dos razones: 1) porque son casos específicos de una clase determinada de problemas, clase que podría quedar delimitada por una ley o esbozo de ley, y 2) porque son modelos para encontrar nuevos problemas. Así como un hombre singular es un caso específico que ilustra el concepto de hombre, el problema ejemplar es un caso

específico que ilustra a una clase de problemas. Los diversos problemas ejemplares a los que se enfrenta el estudiante de ciencia durante su educación presentan aspectos comunes que los hace pertenecer a la clase de problemas que la ciencia ha resuelto y seguirá resolviendo durante un periodo normal. Por ejemplo, la segunda ley de la dinámica newtoniana ($F = ma$) tiene entre sus problemas ejemplares la caída libre, el péndulo simple, los osciladores armónicos que actúan entre sí; cada uno de los cuales contiene, entre sus componentes, los tres elementos señalados en dicha ley: 1) fuerzas, 2) masas, y 3) aceleraciones. Y así como este hombre singular me permita discriminar y distinguir a otros hombres de todo aquello que no es hombre, el problema ejemplar permite distinguir, en una gran variedad de problemas, otros problemas similares a él. Los problemas ejemplares de la caída libre, el péndulo simple, los osciladores armónicos que actúan entre sí, entre otros, habilita al estudiante de física para reconocer otros problemas que presenten fuerzas, masas y aceleraciones.

Al tener que solucionar problemas ejemplares, el estudiante de ciencia ha de aprender a encontrar de entre la diversidad, en las diversas situaciones problemáticas que ha de resolver, la similitud o lo que hay de común entre ellas. Si encontrar similitudes es una operación que está dada en el paradigma en cuanto concreta solución de problemas; al asimilarse el paradigma, se asimila ésta como habilidad. Desde otra perspectiva, en el estudiante de ciencia, al estar frente a una serie de estímulos que percibe como determinados datos en las más variadas situaciones, se configura un sistema neural que responde a estímulos de la misma clase, procesándolos de una manera que produzca los mismos grupos de datos. A nivel neural, el estudiante de ciencia, durante su educación, asimila un mecanismo por el que reconoció similitudes en la diversidad y por el cual podrá seguir

reconociéndolas, en el futuro, en nuevas situaciones. De este modo, es como si el estudiante de ciencia, al aprender o asimilar el paradigma, proveyera, en éste, al ojo de la habilidad de captar, en las más variadas situaciones, las similitudes entre ellas, sin necesidad de recurrir a reglas que permitan hallar similitudes. A este respecto, el paradigma kuhniano, como forma de ver, opera en la ciencia de una manera similar a cómo podría operar, en algunos casos, en realidad la moral (que es el modo de ser) en el hombre. Es decir que, aunque se tenga un sistema de normas o un código moral, al momento de actuar moralmente el hombre no siempre las consulta realmente, sino que actúa conforme a ese modo de ser, que está más allá de cualquier norma moral. Por ejemplo, en casos donde se atenta contra la vida de un individuo, éste no se detiene a reflexionar sobre si es bueno o malo matar a quién puede matarlo. En tales circunstancias, más que consultar una norma, parece prevalecer el instinto de sobrevivencia que está inscrito en el ser del hombre en cuanto ser vivo. De igual modo que los entes morales no siempre requieren consultar su código para actuar moralmente, el científico no siempre requiere hacer conciencia de reglas para proceder conforme a los canones de su paradigma o de su ciencia en un determinado periodo. Al buscar similitudes, el científico procede, aun cuando no tenga presente las reglas para ello, a la búsqueda de ellas simplemente por estar habilitado en ellas y para ellas.

Pero para Kuhn, la concreta solución de problemas no sólo se subjetiva o es asimilado por el sujeto como una manera de procesar el estímulo y construir un determinado dato (esto es, como forma de ver), sino que además se subjetiva como una habilidad para solucionar problemas. Los problemas ejemplares son situaciones que ya han sido aclaradas, pero cuya aclaración es desconocida por el estudiante de ciencia al momento de su educación; es

decir, esos problemas cuentan con una concreta solución, una solución ya lograda o definida. La educación del futuro científico consiste precisamente en aprender o asimilar la manera de solucionar problemas que tiene la ciencia al momento de estudiarla, esto es, aprender el paradigma en cuanto concreta solución de problemas, lo cual, hasta cierto grado, implica una manera específica de hacer ciencia. Al estar solucionando los diferentes problemas ejemplares, el estudiante de ciencia estará repasando una y otra vez los procedimientos u operaciones establecidas en la solución ya definida para ellos. De modo que, al aprender esa concreta solución de problemas, el estudiante de ciencia, ya como científico, estará posibilitado para repetir una y otra vez, ante situaciones nuevas y similares a las que ha aprendido a resolver, los mismos procedimientos u operaciones para resolverlos. Al igual que la forma de ver, la manera de solucionar problemas que ha asimilado el estudiante de ciencia durante su educación opera aun cuando no se tengan presente sus reglas.

Durante su educación, el científico se encuentra ante una serie de problemas ejemplares y ante una manera dada de solucionarlos, la cual ha sido asimilada o subjetivada durante el proceso educativo como una habilidad o capacidad para solucionar problemas. Al estar ante nuevos problemas que presentan similitudes con los problemas que ha aprendido a resolver, el científico objetiva su habilidad, realizando más o menos mecánicamente o, según términos de algunos de los críticos de Kuhn, dogmáticamente los mismos procedimientos u operaciones que realizó al resolver los problemas ejemplares. De este modo, el científico, al estar frente a un nuevo problema que presenta características similares a los que ha resuelto durante su preparación, una vez que percibe las similitudes e incluye a éste dentro de la clase de problemas que está capacitado para resolver, ha de proseguir a su

solución haciendo uso de la concreta solución de problemas. Sin más, el científico, al intentar resolver un nuevo problema que incluye dentro de la categoría de problemas que ha aprehendido a resolver, procede a resolverlo aplicando más o menos el mismo grupo de operaciones que aplicó al solucionar los problemas ejemplares. Sin embargo, para Kuhn, esto de ninguna manera implica que los nuevos problemas se resuelvan tan sólo por aplicar mecánicamente las mismas operaciones; pues en la solución de diversos problemas ejemplares, el científico también aprende que, aunque las soluciones de cada uno de ellos son parecidas, no son totalmente idénticas. De modo que, al buscar éste una solución al nuevo problema, modele una solución parecida, mas nunca idéntica a la aplicada a un problema ejemplar específico. Como concreta manera de solucionar problemas, el paradigma no sólo procede en la búsqueda de similitudes, sino que además nunca hace a un lado las diferencias. Quien al resolver, por ejemplo, problemas de caída libre y de péndulo simple, no sólo reconoce a " $F = ma$ ", en " $mg = m \frac{d^2 s}{dt^2}$ " y " $mg \sin \theta = - ml \frac{d^2 \theta}{dt^2}$ " como expresiones de sus soluciones, sino además sabe que son variaciones de aquella. El paradigma, como una dada manera de proceder al resolver problemas, habilita tanto para encontrar similitudes entre las diversas soluciones como para encontrar las variaciones entre las soluciones de una misma clase. Para Kuhn, pues, los científicos no resuelven los nuevos problemas copiando sus soluciones de soluciones ya dadas, sino que "resuelven los enigmas modelándolos sobre anteriores soluciones de enigmas" (Kuhn, "Posdata", pág. 290).

La concreta solución de problemas es un aspecto, entre otros del paradigma, que muestra una faceta objetiva y otra subjetiva. En un primer momento se muestra como una serie de operaciones que resuelven determinados problemas ejemplares. En segundo lugar se muestra como una habilidad de

solucionar problemas, que asimila o subjetiva el estudiante de ciencia durante su preparación. Y finalmente esa habilidad nuevamente se objetiva, durante la vida productiva del científico, al realizar éste las mismas operaciones que una vez contempló en sus maestros al momento de solucionar problemas ejemplares. El paradigma, pues, está constituido de diferentes aspectos, los cuales, lejos de permanecer fijos o estáticos, están en una movilidad e interacción. La vitalidad de sus diferentes aspectos, es lo que hace del paradigma una entidad compleja y dinámica; razón por la cual el paradigma es, en realidad, la fuerza que induce, durante los periodos normales, una dirección a la ciencia (esto es, una manera de hacer ciencia) e induce los cambios en la ciencia durante las revoluciones científicas.

LA IDEA DE COMUNIDAD CIENTIFICA

Uno de los puntos en los que Kuhn queda un tanto corto en cuanto a la exposición de los conceptos que constituyen su teoría del cambio científico, es el relativo al concepto de comunidad científica. Aun cuando se trata de un concepto íntimamente relacionado al concepto de paradigma —el cual es, como hemos intentado mostrar en la sección anterior, un concepto fundamental en la teoría de las revoluciones científicas—, Kuhn no profundiza en él en su Posdata de 1969. Bien pareciera que, para Kuhn, es un concepto que no requiere más precisiones de las que se han dado en su obra de 1962; esto en razón de que es un concepto que no ha sufrido notables modificaciones. De ahí que Kuhn, en la Posdata de 1969, se limite a hacer una "breve exposición de la noción intuitiva de comunidad científica que ya se encuentra en la Estructura de la revoluciones científicas" (Ibidem, pág. 272).

Sin duda, para Kuhn, la comunidad científica es una entidad tan real y existente como el paradigma mismo; a tal grado que la existencia de un paradigma presupone la existencia de una comunidad científica y la existencia de una comunidad científica presupone la existencia de un paradigma. Para Kuhn, "un paradigma es lo que comparten los miembros de una comunidad científica y, a la inversa, una comunidad científica consiste en unas personas que comparten un paradigma" (Ibidem, pág. 271). Esta afirmación, como el propio Kuhn lo indica, aunque es una circularidad, no es viciosa. Se trata más bien, de acuerdo a nuestro punto de vista, del reconocimiento de

la relación de interdependencia que hay entre el paradigma y la comunidad científica.

Entre el paradigma y la comunidad científica parece haber la misma relación de interdependencia que hay entre dos nociones de la lógica clásica, a saber, entre el contenido y la extensión del concepto. De acuerdo a la lógica, todo concepto tiene estas dos propiedades. El contenido son las propiedades o cualidades de los entes al que se refiere el concepto; por ejemplo, el contenido del concepto cuadrado es, entre otras cualidades: 1) cuatro lados iguales entre sí, 2) dos diagonales perpendiculares entre sí, 3) cuatro ángulos internos de 90 grados. La extensión es la totalidad de miembros que abarca el concepto o que tienen las propiedades del contenido; por ejemplo, la extensión del concepto cuadrado es la totalidad de los entes que tienen las cualidades mencionadas en el contenido, con lo cual cada cuadrado singular es parte de la extensión. Para determinar la extensión del concepto cuadrado, tendríamos que discriminar a todos los objetos existentes, tanto los que existen objetivamente como los que existen subjetivamente, a fin de contar como parte de la extensión del cuadrado a cada uno de los entes que tengan las características mencionadas en el contenido del cuadrado. Sólo se incluye dentro de la extensión del concepto cuadrado a aquellos objetos que tienen las cualidades: cuatro lados iguales entre sí, dos diagonales perpendiculares entre sí, cuatro ángulos internos de 90 grados, etc. De igual modo, sólo pertenecerán a una comunidad científica determinada los individuos que adopten el paradigma que corresponde a esa comunidad.

Pero por qué si un paradigma específico delimita a una comunidad científica específica, Kuhn asevera, en la Posdata de 1969, que "las comunidades científicas pueden aislarse sin recurrir previamente a paradigmas" (Idem). Pareciera que la comunidad científica, contrariamente a

lo que hemos expuesto, pudiera existir antes o al margen del paradigma. Sin embargo, no es así. La afirmación de que "un paradigma es lo que comparten los miembros de una comunidad científica y, a la inversa, una comunidad científica consiste en unas personas que comparten un paradigma" es una afirmación que se refiere a la condición óptica que hay en la relación entre el paradigma y la comunidad científica; en tanto que la afirmación de que "las comunidades científicas pueden aislarse sin recurrir previamente a paradigmas" es una afirmación que se refiere a la condición epistémica que puede haber entre el paradigma y la comunidad científica. En cuanto a la condición óptica, un paradigma aísla realmente a un grupo de individuos o, en otros términos, esos individuos realmente poseen, en común, todos los aspectos que contiene un paradigma. En lo epistémico, podrían enumerarse todos los miembros de una comunidad científica aun cuando no se tenga presentes todos los aspectos del paradigma que han de satisfacer cada uno de los miembros de la comunidad científica. Una cosa es que los miembros de una comunidad científica posean todos y cada uno de los aspectos que caracterizan a un paradigma; y otra cosa es que sólo pueda reconocerse algunos aspectos del paradigmas y con ellos identificar a una comunidad científica. Lo que Kuhn está dejando en claro es que se puede reconocer a una comunidad científica aun cuando no se pueda verificar en todos y cada uno de sus miembros todos y cada uno de los aspectos del paradigma, esto es, aun cuando no se recurra al paradigma, sino tan sólo a alguno de sus aspectos.

Me parece inteligente de parte de Kuhn, dada la complejidad y naturaleza del paradigma, intentar identificar a la comunidad científica por algunos de los aspectos del paradigma. En la sección anterior señalamos que el paradigma está constituido de aspectos de naturaleza objetiva y subjetiva. Los aspectos objetivos serían aquellos que pueden percibirse como dados en el científico;

en tanto que los subjetivos serían aquellos que no se pueden percibir como dados en el científico, aun cuando en efecto estén dados en él. A juzgar por la idea de comunidad científica que mantiene Kuhn en la Posdata de 1969, bien parece recomendar considerar los aspectos objetivos del paradigma en la delimitación de la comunidad científica. Nótese como en esta idea sobresalen aspectos del paradigma que pueden ser más fácilmente reconocidos; Una comunidad científica es:

a) un grupo de individuos que practican una especialidad científica, esto es, individuos que muestran una conducta científica específica.

b) individuos que practican la especialidad científica a grado no igualado en otros ámbitos. Son ellos, más que ningún otro grupo de individuos, los que dedican más esmero y tiempo a las labores específicas de su ciencia.

c) individuos que han tenido una educación y una iniciación similares, y que, en ello, han absorbido la misma bibliografía y sacado muchas lecciones idénticas de ella. Individuos que se han educado con los mismos libros de texto y que, de ellos, han aprendido la misma manera de solucionar problemas.

d) Individuos entre los que hay una comunicación casi plena y un juicio profesional relativamente unánime. Individuos entre los que se percibe un diálogo fluido en relación a los asuntos que a ellos interesa; individuos entre los que se capta un acuerdo en las conclusiones que emiten.

Por los aspectos a y b, Kuhn concluirá que "las comunidades científicas son las unidades productoras del conocimiento científico. Y por el aspecto d concluirá que las comunidades científicas son las unidades validadoras del conocimiento científico" (Cfr. Ibidem, pág. 274).

Una comunidad científica es, pues, un grupo de individuos que poseen, como científicos, todos y cada uno de los aspectos del paradigma, aun cuando

sólo puedan verificarse en ellos algunos aspectos del paradigma, mediante "el análisis del comportamiento de los miembros de una comunidad dada" (Ibidem, pág., 271)

LA CIENCIA NORMAL

Uno de los sentidos más difundidos del término normal, al cual parece apegarse el uso que de él hace Kuhn al hablar de ciencia normal, es el de normal como aquello que sucede con mayor frecuencia, es decir, aquello que se manifiesta o presenta con mayor cantidad de veces. Sin embargo, si a cada etapa de ciencia normal le sigue una etapa de ciencia extraordinaria o revolucionaria, es de esperar que tanto una como la otra se han dado con la misma frecuencia durante la historia de una ciencia, con lo cual sería un tanto difícil, desde esta perspectiva, marcar una diferencia entre ciencia normal y extraordinaria. Al aplicar el término normal como adjetivo para caracterizar o destacar una manera de hacer ciencia, Kuhn tiene en mente periodos prolongados de practicar la ciencia frente a periodos que son breves. Esto es, la ciencia normal es una manera de hacer o practicar ciencia que se presenta en una mayor cantidad de tiempo durante la historia de las ciencias.

Específicamente, la normalidad de la ciencia tiene que ver con un comportamiento que es común entre todos los miembros de cualquier comunidad científica, que consiste en realizar su labor en, por y para el paradigma que delimita a su comunidad. Es normal, pues, que durante la mayor parte de su vida profesional, el científico se aboque a una labor de limpieza dentro del paradigma de su comunidad, labor que, contrariamente a lo que suponen los críticos de Kuhn, de ninguna manera demerita la perspicacia y el ingenio del

científico. Lo normal en la ciencia es que el científico realice su trabajo dentro de los cauces que sigue toda una comunidad, en, por y para el mismo paradigma. Para Kuhn, "la ciencia normal significa investigación basada firmemente en una o más realizaciones científicas pasadas, realizaciones (o paradigmas) que alguna comunidad científica particular reconoce durante cierto tiempo, como fundamento para su práctica posterior" (Kuhn, La estructura de las revoluciones científicas, pág. 33). Del paradigma a la ciencia normal existe una relación de fundamentación que repercute sobre el mismo paradigma, en tanto que el trabajo realizado en la ciencia normal va encaminado a ampliar tanto el campo de aplicación del paradigma como la precisión con la que se aplica al campo ya conocido.

En otro de sus aspectos, el paradigma como entidad que define los problemas y métodos legítimos de un campo de investigación, es un logro sin precedentes y una entidad incompleta. Es decir, para Kuhn, en cuanto a este aspecto se refiere, el paradigma es una entidad susceptible de ajustes y mejoras. Es precisamente esta condición del paradigma la que motiva o da origen a la ciencia normal. El que un paradigma resuelva, de entrada, con éxito algunos problemas, establece la promesa o expectativa de que mediante él puedan resolverse otros problemas más. En este sentido, como lo indica Kuhn, "la ciencia normal es la realización de esa promesa" (Ibidem, pág. 52). De este modo, la ciencia normal surge motivada, por un lado, por los problemas que ha logrado solucionar un paradigma (es decir, para que el científico decida adoptar un paradigma como instrumento de trabajo, es condición, entre otras cosas, que este instrumento muestre ser útil, esto es, que muestre solucionar problemas), y, por otro lado, por la esperanza de que, así como ya ha solucionados determinados problemas, pueda resolver otros nuevos de iguales características. En tanto que el paradigma surge como algo

incompleto, es el dínamo que mueve a la ciencia normal a completarlo, a ampliar el dominio de fenómenos que explica o problemas que resuelve.

La ampliación de la cantidad de problemas resueltos por el paradigma motiva un tipo de trabajo que, por el lado teórico, lleva a la ciencia normal a desarrollar predicciones (esto es, explicaciones derivadas del propio paradigma a hechos desconocidos pero previstos de alguna u otra manera) y, por el lado empírico, ingeniosos experimentos u observaciones que permitan verificar qué tanto se da en realidad lo predicho por el paradigma, a desarrollar instrumentos de observación que llevan dentro de su propio diseño o principios de funcionamiento al paradigma en cuestión.

Sin embargo, ampliar la extensión de los problemas que resuelva o el ámbito de los fenómenos que explica el paradigma no es sino tan sólo una parte de los problemas que ha de enfrentar la ciencia normal. El paradigma no sólo se muestra incompleto por los problemas que le haga falta resolver. Lo es también por los ajuste que sea necesario hacerle. De modo que otra categoría de problemas de la ciencia normal, quizá la más relevante para el paradigma, es relativo al de su articulación. Esta categoría de problemas se debe, para Kuhn, a que el paradigma, en su primera o primeras formulaciones, carece de la suficiente precisión como para explicar suficientemente lo que acontece en la realidad, es decir, su acuerdo con la naturaleza es aproximado y, por ende, incompleto. Desde su origen, el paradigma presenta una serie de deficiencias en su formulación, en su acuerdo con la naturaleza, que requiere y mueve a la ciencia normal a reformularlo o eliminar sus ambigüedades residuales. Así pues, una parte considerable del trabajo empírico y teórico, dentro de la ciencia normal, además de la anterior categoría, está encaminado a aumentar el acuerdo entre el paradigma y la naturaleza, lo cual implica articular o reformular el paradigma.

Estas dos categorías de problemas que aborda la ciencia normal la caracterizan, más que ninguna otra categoría de problemas que aborde, como una ciencia encaminada a la resolución de rompecabezas. Las soluciones a los problemas que mediante el paradigma se busca resolver son como piezas del rompecabezas que aún no se tienen a mano. Al igual que éstas, las soluciones a los problemas por resolver poseen de antemano características establecidas por el paradigma; son soluciones que, aunque nuevas, no son del todo novedosas. El que las soluciones de la ciencia normal a sus problemas estén previstas se debe fundamentalmente a que el paradigma que la determina delimita una clase específica de problemas o fenómenos. Se puede decir que, dado que "ninguna parte del objetivo de la ciencia normal está encaminada a provocar nuevos tipos de fenómenos" (Ibidem, pág. 53), los problemas que se plantean y las soluciones que se buscan, aunque diferentes específicamente, tienen características generales comunes. Las soluciones de la ciencia normal, aunque no se tengan a la mano, se encuentran definidas en sus características generales, aguardando a que algún científico se decida buscarlas y depositarlas en el marco del rompecabezas.

Quién ha armado un rompecabezas se habrá percatado que, en ocasiones, éste cuenta con piezas que tienen algunos contornos similares; razón por la cual pueden acoplar con alguna otra pieza, sobre todo mientras no se han dispuesto la mayoría de las piezas en sus respectivos lugares. Supóngase, por ejemplo, que las piezas A,B,C,D y E de un rompecabezas cuenta cada una con cuatro lados, uno de los cuales es común en las cinco piezas por acoplar con la pieza F ya dispuesta correctamente, y todos los demás diferentes entre sí. Mientras no se cuente con una pieza contigua a F que acople con uno de los restantes lados de una sola de las piezas, cualquiera de éstas se pueda disponer junto a F. Supóngase que un tanto arbitrariamente se acopla a F una

pieza equivocada, de modo que al momento es inapreciable el error. Es sólo cuando se coloca la pieza contigua a F, que ésta ofrece información que permite apreciar el equívoco y, por ende, remover la pieza equivocada, a fin de colocar la correcta. De manera análoga, una parte importante del trabajo empírico y teórico, en la ciencia normal, está encauzado a determinar cuantitativamente hechos que permitan una mejor articulación del paradigma. Esta categoría de trabajo tiene dos finalidades o subdivisiones. La primera finalidad, como en el caso de quiénes trabajaron a fin de determinar un valor de suma importancia para la mecánica newtoniana, es la de establecer constantes. La segunda finalidad es la de establecer leyes. En uno u otro caso, la ciencia normal procede a determinar cuantitativamente algo que de antemano se da por hecho. La determinación cuantitativa de constantes y leyes, dentro de la ciencia normal, es la búsqueda de las piezas que ofrezcan detalles que permitan un mejor acomodo de las piezas del rompecabezas o del paradigma. El reacondo de piezas, por otras que ofrezcan información que permite un mejor ajuste de piezas, tiene por propósito lograr una imagen consistente e integral que se sabe se encuentra ahí desde el inicio del juego, una imagen que, si bien no se conoce porque todas las piezas se encuentran diseminadas desordenadamente en la caja del rompecabezas, promete ser reconocida. La imagen incompleta que se tiene antes del reacondo de piezas se ajusta menos a la imagen final que se busca, que la imagen incompleta después del reacondo. De modo análogo, al igual que una imagen incompleta se encuentra más distante que otra, de la imagen final, en el paradigma, con su reformulación o rearticulación, se busca una mejora en el acuerdo entre éste y la realidad, esto es, si se me permite decirlo de este modo, acercar la imagen que tiene el paradigma de la realidad con lo que es la realidad en sí misma.

El propósito de la ciencia normal, desde esta perspectiva, es la de completar una imagen con todas sus piezas. Cada pieza que se coloca correctamente sobre el tablero del rompecabezas, significa un nuevo conocimiento que se suma a los ya antes logrados. De este modo, en la ciencia normal, el desarrollo de la ciencia se da en un sentido acumulativo.

LA CRISIS

En una ocasión escuche en alguna clase de filosofía de la ciencia que "La Estructura de las Revoluciones Científicas" de Kuhn, era de las obras menos comprendidas de este influyente pensador. Afirmación que parece paradójica si se hace junto al señalamiento de que es una obra poco extensa. A decir verdad, no me parece que una obra que aborda un tema tan complejo y, por ello, extenso sea exhausto en su exposición cuando destina unas cuantas páginas a ello. En ocasiones, en aras de la economía, se pierde precisión y genera confusiones. Es precisamente la brevedad de esta obra -la cual parece responder a una típica manera de exponer del científico, esto es, no usar más ni menos de las expresiones necesarias- la que pudiera dar pie a su incomprensión. Uno de los puntos de esta obra que se presta a confusión es el relativo a los términos "crisis" y "ciencia extraordinaria".

Entre dos periodos de ciencia normal, diferentes entre sí, hay un periodo de transición que conduce de uno al otro, al cual indistintamente pudiera llamársele, como parece hacerlo Kuhn estado anormal (o crisis) o ciencia extraordinaria (o revolución). Estos términos pudieran ser inequívocamente equivalentes si este periodo fuera un simple paso de un periodo normal a otro. Sin embargo, a juzgar por la descripción que de éste hace el propio Kuhn, se trata de un proceso un tanto complejo, que nos obliga a no caer en una interpretación simplista de los términos crisis y ciencia extraordinaria, que los equipare o distinga totalmente. Por ejemplo, una comparación y

análisis de los siguientes dos fragmentos sugiere una distinción de los términos: "Creo que es, sobre todo, en los periodos de crisis reconocida, cuando los científicos se vuelven hacia el análisis filosófico como instrumento para resolver los enigmas de su campo". Y más adelante, de manera concluyente, agrega: "La proliferación de articulaciones en competencia, la disposición para ensayarlo todo, la expresión de descontento explícito, el recurso a la filosofía y el debate sobre los fundamentos, son síntomas de una transición de la investigación normal a la no-ordinaria" (Vid Ibidem, pág. 143-148). En la última parte de esta cita, Kuhn distingue tres momentos: 1) un momento de transición, 2) un momento de investigación normal y 3) un momento de ciencia o investigación no ordinaria. Por lo que se refiere a la distinción entre ciencia normal y ciencia no ordinaria, es una distinción que queda claramente establecida en Kuhn. Y por lo que se refiere a los síntomas del momento de transición, es claro que éstos no son características de la ciencia normal; razón por la cual el momento de la investigación no-ordinaria, al que Kuhn hace mención en esta cita, debe distinguirse del momento mismo de la investigación normal. Para Kuhn, como historiador, es claro que en la historia de la ciencia se dan periodos que no están definidos, periodos que muestran tanto aspectos de un periodo que se ha de abandonar como aspectos de un periodo que se ha de adoptar; la transición es un periodo intermedio entre estos dos periodos. En esta misma cita, Kuhn señala, entre otros, como síntoma de la transición hacia la ciencia no ordinaria el recurso a la filosofía. Ahora bien, si es en los periodos de crisis reconocida cuando los científicos se vuelven hacia el análisis filosófico como instrumento para resolver los enigmas de su campo (esto es, se vuelven a la filosofía como recurso); se infiere que la crisis es un periodo de transición hacia la ciencia no ordinaria, lo cual significa que la

crisis y la ciencia no ordinaria (o extraordinaria) son dos momentos diferentes de un mismo proceso. Sin embargo, en algunos otros fragmentos los términos son utilizados de manera equivalente.

Pero no es que Kuhn se contradiga en su pensamiento cuando en parte identifica los términos y en otras más los distingue. Más bien, al igual que con el término paradigma, el estilo literario de Kuhn conduce a la ambigüedad antes referida. Si Kuhn usa indistintamente estos términos, es porque cualitativamente no existe diferencia entre la crisis y la ciencia extraordinaria, es decir, porque en ambas se manifiestan más o menos los mismos síntomas y se encuentran colindando con periodos normales. Aunque cualitativamente la crisis y la ciencia extraordinaria se identifican, cuantitativamente se diferencian entre sí; esto es, el grado con que se manifiestan los síntomas difiere de una a otra, además de que la posición que tiene tanto una como la otra respecto a los periodos normales difiere. Es decir, la crisis es el periodo inmediato posterior al periodo de ciencia normal del que se sale o abandona, en tanto que la ciencia extraordinaria es el periodo inmediato anterior al periodo de ciencia normal al que se ha de entrar o adoptar. Hecha esta aclaración, intentemos describir lo que es la crisis para Kuhn.

Aunque la mayoría del tiempo la ciencia procede de una manera normal, por momentos más o menos breves entra en periodos de crisis o estados anormales. Las crisis, en la ciencia, son, por un lado, el anuncio del ocaso del paradigma que preside el trabajo científico en una determinada etapa y, por otro, la antesala a uno nuevo, que ha de sustituir a aquel primero. Cada crisis que se presenta durante la historia de una ciencia específica es un periodo que limita o media entre el periodo normal que se ha de abandonar y

el proceso revolucionario que ha de desembocar en un nuevo periodo normal, uno y otro con su respectivo paradigma.

Como periodo posnormal, la crisis es, fundamentalmente, el periodo en el que el papel rector del paradigma cesa; es decir, durante este periodo el paradigma deja de dirigir la práctica científica. De ahí que, en clara oposición a la ciencia normal -la cual se caracteriza por tener un paradigma o conjunto de paradigmas que determinan la manera cómo se trabaja en ella-, Kuhn denomina también a ésta como estado anormal.

Por esta razón, una crisis se inicia no cuando aparece una anomalía, sino cuando la manera normal de tratar los enigmas cesa, situación esta que tiene que ver con la caída del paradigma o pérdida de fe en él como instrumento de trabajo. Aun cuando la crisis depende íntimamente de la anomalía, ello no significa que al momento que aparezca ésta aparece aquella otra; por lo cual no toda anomalía conlleva una crisis. Al distinguir Kuhn entre anomalía y crisis -como se aprecia en la siguiente afirmación que se refiere a la crisis: "Ya indiqué que es una respuesta que una parte de la comunidad científica da a su conciencia de una anomalía en la relación entre la teoría y el experimento" (Kuhn, *La Tensión esencial*, pág. 226)-, los distingue en sus momentos de manifestación. La crisis sigue o puede seguir a la toma de conciencia de la anomalía sólo cuando la propia anomalía se resiste a ser resuelta mediante los procedimientos normales o acostumbrados, como se sugiere en las siguientes palabras: "Estos científicos, habiendo agotado todos los recursos acostumbrados de aproximación e instrumentación, pueden verse forzados a reconocer que algo anda mal. En estas condiciones, en grado mucho mayor que en cualquier otras, el científico empezará a investigar, ensayando todo lo que, según él, tenga posibilidades de esclarecer la naturaleza de su dificultad" (Kuhn, *op. cit.* pág. 227). Para Kuhn, pues, la

crisis comienza cuando el científico agota la manera normal de abordar las discrepancias entre la teoría y la experimentación u observación y empieza a investigar al azar o sin la guía del paradigma que había seguido hasta ese entonces.

Sin embargo, aunque durante la crisis el paradigma cesa en su papel rector de la práctica científica, la figura de éste aún está presente en el científico como compromiso. Es decir, aunque su trabajo ya no sigue los lineamientos que se establece en su paradigma, éste aún tiene el propósito de resguardar la reputación de su paradigma o, desde otra perspectiva, encontrar una solución de la anomalía que no ponga entredicho a su paradigma como forma de ver las cosas. En este sentido puede entenderse que Kuhn afirme, sin entrar en conflicto con lo arriba indicado, que "la decisión de rechazar un paradigma es siempre, simultáneamente, la decisión de aceptar otro (Kuhn, La estructura de las revoluciones científicas, pág. 129). La crisis, en la ciencia, es, de manera análoga, como la ruptura en una relación amorosa que priva físicamente entre sí a uno del otro a los participantes de ésta; sin que por ello, al momento, se olvide uno del otro. La crisis, desde esta perspectiva, significa un abandono parcial del paradigma; un abandono que no es otra cosa mas que el reconocimiento de la incapacidad del paradigma para solucionar una anomalía; es decir que el paradigma, como concreta solución de problemas, ha dejado de operar. Sin embargo, a pesar de que la concreta solución de problemas se muestra incapaz de solucionar la anomalía y, por ello, el paradigma pierde su función operativa, como forma de ver aún se mantiene en pie. Es precisamente durante la revolución o ciencia extraordinaria que el paradigma ha de perder su última batalla y ha de ser abandonado totalmente. Durante la revolución se ha de hacer a un lado -más no liquidado definitivamente- lo que del paradigma aún permanece en pie, esto

es, su forma de ver. El escenario de la revolución es el de la batalla entre un viejo paradigma que ha dejado de funcionar prácticamente pero cuya forma de ver aun mantiene entre sus adeptos a la mayoría de los miembros de una comunidad científica y un nuevo paradigma que ya ha empezado a funcionar, resolviendo la anomalía que dio origen a la crisis, pero que aún no cuenta con la simpatía de la comunidad científica, ni como manera de solucionar problemas ni como forma de ver.

REVOLUCION CIENTIFICA

De acuerdo al sentido común, lo simple, a diferencia de lo complejo, es aquello que carece de partes y, por ende, de una estructura. Si aplicamos este sentido al uso que hace Kuhn de este término en el título de su más polémica obra, *La Estructura de las Revoluciones científicas*, es de esperar que las revoluciones científicas sean algo más que un simple cambio de paradigma, esto es, no se trata de un cambio que se realice de un momento a otro. Se trata, como a continuación veremos, de un proceso complejo que tiene por etapa final el momento en que se consuma la sustitución del paradigma.

Al enumerar los aspectos que permiten establecer una similitud entre el cambio de instituciones y el cambio de paradigma, Kuhn señala dos aspectos comunes a ambos, por los cuales al primero de antemano se le conoce como revolución política y al segundo pudiera llamársele revolución científica. El primero de ellos es el sentimiento de que aquello que venía gobernando a la comunidad no funciona como debiera funcionar. En el caso de la revoluciones científicas, este aspecto se manifiesta cuando surge el "sentimiento de que un paradigma existente ha dejado de funcionar adecuadamente en la exploración de un aspecto de la naturaleza" (*Ibidem*, pág 149). El segundo aspecto es la tendencia al cambio; que en el caso de la revolución política es el cambiar las instituciones políticas por otras. Si hay que tomar en serio esta similitud, como lo hace Kuhn; habrá que distinguir, en las revoluciones científicas, entre el sentimiento de que un paradigma ha dejado de funcionar adecuadamente y el movimiento mismo que conduce al cambio de paradigma.

De acuerdo a la sección anterior, las crisis se inician cuando el científico se percató que el paradigma, después de utilizarse todos sus recursos sin éxito alguno en la solución de una anomalía, ha dejado de operar como instrumento de trabajo, es decir, que mediante él no se puede resolver un problema. Justo en este momento, el paradigma pierde presencia práctica, esto es, deja de dirigir el trabajo científico. Es precisamente la ausencia de paradigma, como instrumento de trabajo, la que se manifiesta como sentimiento de un mal funcionamiento de éste. Las crisis, por lo tanto, son un aspecto de las revoluciones científicas.

Como aspecto de las revoluciones científicas, las crisis tienen un papel fundamental dentro de éstas. Como sentimiento de malestar, por el abandono del paradigma al trabajo científico, las crisis son las que inducen al cambio, a la búsqueda de un nuevo candidato que venga a superar el vacío que ha dejado aquel paradigma. Sin crisis, los cambios revolucionarios no tienen razón de ser. Sólo quién padece la angustia de la crisis puede hacer algo por sentirse bien. Por el contrario, quién vive en paz o sin angustias querrá prolongar esa sensación y mantener lo que la provoca. El cambio por el simple hecho de cambiar no tiene cabida en la ciencia. Sólo el malestar por el mal funcionamiento del paradigma es el que induce a cambiarlo.

El otro aspecto de las revoluciones científicas, al que con toda propiedad pudiera llamársele revolución o ciencia extraordinaria, es el cambio en sí mismo, el cual se suscita por la crisis como un periodo posterior a ella, como se sugiere en las siguientes líneas: "Después del periodo anterior al paradigma, la asimilación de todas las nuevas teorías y de casi todos los tipos nuevos de fenómenos ha exigido, en realidad, la destrucción de un paradigma anterior y un conflicto consiguiente entre escuelas competitivas de pensamiento científico" (Ibidem, pág 155). En estas

líneas de Kuhn pueden distinguirse tres periodos: 1) el periodo anterior al paradigma (que sería propiamente el periodo de crisis), 2) el periodo del paradigma (que correspondería al periodo en el que se establece el nuevo paradigma y se inaugura un nuevo periodo de ciencia normal, en el que, por definición, no existe competencia, sino consenso entre los miembros de la comunidad científica), y 3) un periodo que está entre el periodo anterior al paradigma y el periodo del paradigma. Si entre el periodo de crisis y el nuevo periodo de ciencia normal no existiera un periodo intermedio; entonces el "después" de la afirmación antes citada se estaría refiriendo al periodo en el que se establece el nuevo paradigma, que es el que seguiría inmediatamente al de crisis. Pero en este caso, Kuhn estaría cayendo en contradicción. Al referirse al periodo que cierra o sigue a las crisis, Kuhn lo describe en los siguientes términos: "todas las crisis concluyen con la aparición de un nuevo candidato a paradigma y con la lucha subsiguiente para su aceptación" (Ibidem, pág. 139); es decir, es un periodo en el que existe una lucha, producto del desacuerdo, que pretende, por una de las partes, se acepte el nuevo paradigma. Contrariamente a como se describe en esta afirmación al periodo que sigue a la crisis, Kuhn afirma que en la ciencia normal -en la que un paradigma se encuentra establecido como una forma de ver el mundo y hacer ciencia-, no existe competencia, sino consenso, es decir, no se da el desacuerdo y la lucha entre los miembros de la comunidad científica. Es evidente, pues, que, si el periodo que sigue al de crisis fuera el del establecimiento del nuevo paradigma, Kuhn se estaría contradiciendo. Como es poco probable que Kuhn se haya contradicho en un punto en el que puso especial cuidado, consideramos que, en efecto, entre el periodo de crisis y el periodo en el que queda establecido hay un periodo al que Kuhn llama de

ciencia extraordinaria, que es un periodo en el que el nuevo paradigma aún no ha triunfado o ha quedado establecido.

Aunque la crisis y la ciencia extraordinaria se encuentran íntimamente ligadas entre sí, formando un proceso complejo de transición de un paradigma a otro o etapa de ciencia no normal, entre una y otra existe no sólo una diferencia cronológica o de manifestación en el tiempo, sino además una diferencia un tanto sustancial. Lo normal u ordinario en la ciencia es trabajar bajo la dirección de un paradigma, por el cual los miembros todos de una comunidad científica coinciden tanto en la forma de ver el aspecto de la realidad que investigan como la manera en cómo lo investigan. Por lo que respecta a la crisis, su anormalidad radica en la ausencia del paradigma como instrumento de trabajo, es decir, que el paradigma ha dejado de operar en el trabajo científico, aun cuando su figura permanezca y haya esperanza de que vuelva a tomar el papel que venía desempeñando. En el caso de la ciencia extraordinaria, su anormalidad consiste, entre otras cosas, en llevar dentro de sí la pugna de lo irreconciliable, esto es, entre un paradigma que ha perdido el control sobre el trabajo científico pero al que aún están comprometidos casi la mayoría de la comunidad científica, y un candidato a paradigma que promete dar de nuevo sentido y control a la actividad científica pero que aún no cuenta con la simpatía suficiente entre la comunidad. Al igual que en las revoluciones políticas, las revoluciones científicas se dan en las acciones que libra una parte de la comunidad científica contra aquellos que se afanan por mantener el estado anterior del paradigma.

Es en este escenario de pugna donde se suscita el ambiente que provee a la ciencia extraordinaria de su carácter revolucionario. En la ciencia ordinaria, el trabajo científico se realiza en y para el paradigma. Es decir,

es un trabajo encaminado a fortalecer al paradigma, que se nutre en el propio paradigma. En la ciencia normal, el paradigma es la premisa y conclusión, el punto de partida y el punto al que se ha de llegar en la actividad científica. Por esta razón, en la ciencia normal, existe una circularidad en la argumentación, una circularidad que se rompe en la ciencia extraordinaria.

En este sentido, lo extraordinario en la ciencia se manifiesta cuando se hace necesario y de hecho se recurre a elementos ajenos al paradigma, a argumentos extraparadigmáticos, en su defensa, tanto por parte del paradigma que venía dirigiendo la actividad científica como por parte del paradigma que le viene a disputar ese papel. A este respecto Kuhn señala: "Como la cuestión de la competencia de normas, esta cuestión de valores sólo puede contestarse en términos de criterios que se encuentran absolutamente fuera de la ciencia normal y es ese recurso a criterios externos lo que de manera más obvia hace revolucionarios los debates paradigmáticos" (Ibidem, pág. 175). De igual modo que en las revoluciones políticas se recurre a instancias ajenas a la vida diaria normal para dirimir diferencias, como los son las armas; la revolución científica se da en el plano del debate, donde las únicas armas con las que cuentan ambos contrincantes son los argumentos que puedan ofrecer. Estos argumentos tienen una doble función. Por un lado, son el arma que utilizan los simpatizantes de un paradigma para su defensa y, por otro, es el arma por medio de la cual se pretende debilitar y aniquilar al oponente. Los argumentos y contrargumentos son criterios extraparadigmáticos que argüyen los simpatizantes de un paradigma en su defensa y contra sus oponentes.

La operación o utilización de las armas es parte central en los movimientos revolucionarios; su utilización hiere y diezma la vida del oponente. Dado que la esencia misma de la revolución científica se encuentra

en la manera cómo los argumentos operan y diezman o restan adeptos al paradigma antiguo, este es un aspecto que merece especial atención.

La revolución, además de ser un proceso que transcurre durante un lapso de tiempo, es un cambio que dista mucho de ser uniforme; esto es, no se trata de un proceso en el que cada miembro de la comunidad en cambio se convierta al nuevo paradigma de igual modo y al mismo paso. Cada miembro requiere de un conjunto de argumentos específicos y su propio tiempo para adoptar plenamente el nuevo paradigma. Obviamente, esto no implica que no pueda haber dos o más miembros que coincidan en argumentos que los conviertan o en el momento de conversión, o ambos. Ello no sólo depende de la fuerza persuasiva de los argumentos, sino además por el grado de compromiso que tiene cada miembro con el paradigma. Aquellos que han tenido una vida de éxitos científicos en el paradigma, son los más comprometidos y los que más se resisten al cambio. Es tal el grado de compromiso de éstos que sólo su muerte puede consumir la revolución o, como apunta Max Planck, "Una nueva verdad científica no triunfa por medio del convencimiento de sus oponentes, haciéndoles ver las luz, sino más bien porque dichos oponentes llegan a morir y crece una nueva generación que se familiariza con ella" (Vid, Ibidem, pág 235). Por el contrario, aquellos que apenas comienzan en la profesión son los que menor compromiso tienen con el paradigma y los más susceptibles de convertirse prontamente. Deade esta perspectiva, pareciera que las revoluciones científicas fueran un conflicto meramente generacional; pues los que proponen el candidato a nuevo paradigma -el cual entrará en pugna con el anterior-, como lo señala Kuhn, generalmente son jóvenes que apenas inician en la profesión. Sin embargo, dado que los proponentes de un nuevo paradigma no esperan que los más notables y experimentados de su comunidad mueran, sino que se afanan por convertirlos, y dado que los novatos en la profesión no se convierten tan

sólo por su juventud, las revoluciones sólo en parte son un conflicto de generaciones. Por lo demás, son en realidad un conflicto que se desenvuelve entre argumentos.

Aunque los argumentos de cada parte van encaminados a la defensa de sus respectivos paradigmas, éstos no se fundamentan, en última instancia, en él; sino que lo hacen en normas y valores que son extraparadigmáticos. Para ubicar cómo operan éstos en la argumentación o el debate extraparadigmático, es necesario señalar que, en efecto, Kuhn destaca una serie de instancias extraparadigmáticas que han de ser utilizadas como argumentos o parte de ellos por ambas partes del debate revolucionario, a los cuales se les puede agrupar en dos categorías: Por un lado se encuentran los argumentos basados en la habilidad comparativa, entre los que están los resultados que ofrece tanto el antiguo paradigma como el nuevo candidato a la anomalía que suscitó la crisis y la predicción cuantitativa que ofrece este segundo; y por otro los argumentos que se basan en un sentido un tanto estético, como puede ser la sencillez que muestre uno y otro paradigma. De estas dos categorías de argumentos, los que Kuhn señala como más efectivos en la conversión o cambio de paradigma, aunque no suficientemente, es la primera; razón por la cual dedicaremos una sección aparte a la manera cómo éstos operan en la revolución científica.

Sin los argumentos comparativos y estéticos, aunque el nuevo paradigma sea mejor que el anterior o tenga buenas razones para aceptársele, no pueden ser percibidas por el oponente. Estos argumentos de posesión común, junto con otros, hacen posible la transición al nuevo paradigma. De acuerdo a Kuhn, "la incomensurabilidad entre el antiguo paradigma y el candidato a nuevo paradigma conlleva a una interrupción de comunicación entre los partidarios de ambos paradigmas; interrupción que no es del todo total y que poco a poco

se va reestableciendo" (Ibidem, págs 302-312). Pues, por un lado, entre los partidarios de uno u otro paradigma existe una serie de términos que tiene un significado común para ambos, como por ejemplo "el vocabulario que diariamente comparten" (Ibidem, pág. 308). Y, por otro, "poseen una historia casi idéntica, excepto en el pasado inmediato" (Ibidem, pág. 307). Esto es, en virtud de que ambas partes provienen de la misma comunidad científica, comparten un buen cúmulo de estímulos (o experiencias) y respuestas a ellos, que apenas se diversifican durante la revolución. Gracias a estos elementos, la comunicación no se pierde del todo entre los que defienden paradigmas opuestos e incommensurables. Pero así como coinciden en algunas experiencias, respuestas y en el significado de algunos términos; también difieren, al momento de la revolución, en el significado de algunos otros términos y en la respuesta a unos mismos estímulos, diferencias que son, en cierto modo, origen del conflicto.

Si bien la revolución científica no culmina o se resuelve del todo en la superación de estas diferencias, sí es una condición necesaria el que cada una de las partes en conflicto entienda a su oponente, que descubra el uso que le da a cada uno de los términos que difieren en significado. De este modo, para Kuhn, uno de los aspectos que caracteriza a la revolución, al movimiento de sustitución de un paradigma por otro, es el del restablecimiento de la comunicación: "Como la traducción, si se continua, permite a quienes participan en una interrupción de comunicación experimentar algunos de los méritos y defectos de los puntos de vista de los otros, ésta es una potente herramienta tanto de transformación como de persuasión" (Ibidem, pág. 309); es decir que, para Kuhn, la conversión, que en parte es posible gracias a la traducción que restablece la comunicación, "permanece en el núcleo mismo del proceso revolucionario" (Ibidem, pág. 311). Sólo

cuando se entienden los argumentos del oponente se comprende el daño que éstos provocan en el paradigma que se defiende o el arma con la que se defiende al paradigma oponente. En la comunicación reestablecida, los paradigmas se enfrentan, a través de sus teorías, en una franca comparación donde se pone de manifiesto las virtudes y defectos de éstas como sus respectivas armas o argumentos.

Para Kuhn, pues, el proceso por el que se reestablece la comunicación es un proceso de traducción, un proceso en el que los términos de uso común son utilizados como puente que enlaza dos maneras de ver y entender un mismo mundo. En la traducción, los pensamientos o argumentos en favor o en contra de un paradigma no se expresan en términos originales al paradigma, sino en un lenguaje común, comprensible a ambas partes. Es al margen de los términos con significado diferente como se dirimen las disputas revolucionarias. A este respecto Kuhn señala, a manera de ejemplo, que "la controversia Proust-Berthollet se llevó a cabo sin recurrir al término "elemento"" (Ibidem, pág. 310), el cual tenía un significado diferente para cada uno de ellos. Una característica más de la ciencia extraordinaria es la traducción, que es "totalmente un elemento ajeno a la ciencia normal".

La traducción, como agente revolucionario -esto es, como instancia que ha de posibilitar el tránsito de un paradigma a otro-, tiene, de acuerdo a Kuhn, un doble aspecto persuasivo. Por un lado, pone al alcance de un sector de la comunidad escindida, a aquellos que no se abocan a la traducción, los argumentos del oponente que pueden convencerlo a abandonar sus creencias científicas y adoptar las de aquél. En efecto, cuando mediante traducción se "reconoce que el oponente apila un argumento sobre otro y recoge éxito tras éxito, sólo la más ciega obstinación puede evitar adoptar el paradigma mediante el que se logran dichos éxitos" (Ibidem, pág. 310). Y por otro lado,

la traducción conduce al traductor a una transición, esto es, lo hace pensar como aquellos cuyos pensamientos traduce; lo que significa que, si aquellos tienen buenas razones para adoptar sus creencias, éste tiene en mente las mismas razones por las que llega a las mismas creencias.

Sin embargo, dado que la traducción no es algo normal en la ciencia, algo que, por su poca familiaridad, no es digno de confianza, no siempre cumple su función de fin persuasivo; esto es, habrá algunos miembros de la comunidad que manifestarán desconfianza por los argumentos que se le presentan en la traducción, como si ésta fuera parcial y se inclinara a favor de los pensamientos oponentes. Cuando en una revolución política algunos individuos adoptan el papel de intermediarios entre las partes en conflicto, no faltará quién los culpe de traidores por intentar entablar entre éstos un buen diálogo que detenga la masacre y conduzca a una pronta solución del conflicto.

De cualquier modo, cumpla o no su función persuasiva, la traducción no representa el fin de la revolución; es decir, con la persuasión del oponente no se alcanza la meta de la revolución, la de hacer que aquellos que defienden el paradigma antiguo adopten el nuevo como rector del trabajo científico. El papel de la persuasión revolucionaria es el de echar abajo las creencias que aún nutren las esperanzas de que vuelva a gobernar el viejo paradigma. No cabe duda de que, en Kuhn, el proceso de transición de un paradigma a otro es un proceso gradual, que comienza, en la crisis, con una ausencia práctica del paradigma o su incapacidad para seguir dirigiendo el quehacer científico, continúa, en la ciencia extraordinaria, con el gradual debilitamiento de su forma de ver —forma de ver en la que se fincan las esperanzas de volver a trabajar como antes de la crisis— y concluye, en la revolución, con la sustitución del viejo paradigma, tanto en su concreta

solución de problemas como en su forma de ver, por el nuevo. En el proceso de transición de un paradigma a otro, un viejo paradigma cesa primero en sus funciones vitales o prácticas y después en las esperanzas que por él manifestaban sus científicos. La persuasión, desde esta perspectiva, por parte de los partidarios del nuevo paradigma, tiene por propósito no sólo evidenciar la inoperabilidad del viejo paradigma, sino además dejar ver lo difícil o imposible que puede ser hacer operar de nuevo a la ciencia con tan sólo aferrarse a su espíritu.

Una vez que los partidarios del viejo paradigma han dejado de creer en él, el paso siguiente es hacer que aquellos adopten la nueva manera de hacer ciencia. Sin duda, en las revoluciones políticas, el momento culminante es cuando los órganos del nuevo gobierno se instituyen e inician sus funciones. De igual modo, para Kuhn, la revolución científica no habrá concluido mientras el nuevo paradigma no tome el control o la dirección del trabajo científico de la comunidad. Desde esta perspectiva, en la revolución científica distingue Kuhn la conversión de la persuasión. Y es precisamente en la conversión donde los argumentos o normas comparativos, como la precisión cuantitativa o la predicción de nuevos fenómenos por parte del nuevo paradigma, intervienen para resolver la revolución a favor de la progresista manera de hacer ciencia.

LA COMPARACION COMO CONVERSION

El momento culminante de la revolución científica es cuando la mayoría de los miembros de la comunidad científica se han convertido al nuevo paradigma, practicando la ciencia según los lineamientos o instrumentos que para ello provee. Para ello, no sólo es necesario convencer al adversario de las virtudes del nuevo paradigma, sino además mostrar, a través de la comparación con su oponente, las ventajas que mediante su práctica se obtienen. Se trata de un proceso de comparación que tiene por propósito introducir al convencido a la práctica de la ciencia según lo establece la nueva visión.

Para poder describir los matices que encuentro distinguen, en la perspectiva de Kuhn, entre la conversión y la persuasión, permítaseme tomar por analogía algunas de las diferencias que se establecen para dos términos que tienden a confundirse, pero que en ética se refieren a momentos diferentes del acto moral: 1) elección y 2) decisión. Dado que elegir un acto entre otros no implica que necesariamente hemos de realizarlo; es fundamental distinguir entre su elección y su realización. Para que un acto se realice no basta que haya sido destacado por nuestras preferencias o inclinaciones; sino además se requiere que tomemos la clara resolución de llevarlo a cabo. La resolución, o decisión, de llevar al plano real de la práctica una acción no es idéntica a la resolución que toma la conciencia de favorecerlo entre otras acciones. La elección es el juicio que favorece a una acción sobre otras, juicio que proviene o está determinado por nuestro modo de ser o lo que

algunos llaman valores. En tanto que la decisión es el juicio que conduce a la realización del acto favorecido por la elección.

Me parece que Kuhn, al distinguir persuasión de conversión, no sólo está marcando los límites entre lo que es creer en un paradigma y practicar un paradigma, sino que además está señalando los orígenes de una u otra cosa. Por lo que se refiere a la persuasión, ésta, aunque puede basarse en resultados concretos de uno u otro paradigma, tiene fundamentalmente un carácter racional. Esto es, sus argumentos, sean ideas o hechos, no tienen más función que indicar o mostrar cuál de los dos paradigmas en pugna manifiesta más ventajas. La conclusión de los argumentos persuasivos es la indicación de que un paradigma, en sus teorías, frente a las del otro, es mejor o, mejor aún, aventaja a su oponente. Sin embargo, se trata de una indicación que tiene sus reservas de duda; de que, para Kuhn, la persuasión no signifique conversión y de que el persuadido manifieste sus dudas a aquello que por razón se le muestra como mejor. Para dejar en claro esta idea, imagínese a un conductor que se encuentra ante dos caminos que conducen al mismo destino, uno de los cuales muestra un letrero que indica ser el camino más breve a dicho destino. Ante dicha indicación, hay un camino que se muestra mejor al conductor. Sin embargo, se trata de una indicación que al momento no se sabe si sea verdadera o falsa. Ni siquiera recorrer ese camino garantiza al conductor que está recorriendo o ha recorrido en realidad el camino más breve. De igual modo, la persuasión puede mostrar al científico que un paradigma es mejor que su oponente, empero ello no muestra que en realidad dicho paradigma sea mejor.

Para que el conductor corrobore o desmienta el juicio de la indicación ha de recorrer en igualdad de condiciones, con el mismo auto y a la misma velocidad, entre otras cosas, ambos caminos. De igual manera, para que el

científico corrobore o desmienta la indicación que los argumentos persuasivos le hacen respecto a las ventajas de un paradigma, es indispensable que éste tenga la experiencia de operar los métodos o modos de hacer ciencia a través de los cuales se sustentan los argumentos del oponente. Ya sea porque el científico manifiesta duda por los procedimientos que arrojan los resultados que se argüyen a favor de un paradigma o porque manifieste duda de que los resultados que un paradigma ofrezca a su favor correspondan a los procedimientos del propio paradigma; al parecer, para Kuhn, en el científico se da un desconocimiento de la relación resultados-procedimientos, que mueve al científico a aprender los procedimientos o manera de hacer ciencia según el nuevo paradigma, lo que le permite comprender la relación entre los resultados y los procedimientos que conducen a ellos. En suma, lo que conduce al científico a practicar la nueva manera de hacer ciencia es su inquietud de entender cómo se obtienen los resultados que los oponentes ofrezcan a favor del nuevo paradigma, como se sugieren en las siguientes palabras: "Si el nuevo punto de vista se sostiene durante un tiempo y sigue siendo útil, los resultados de la investigación verbalizables de esta manera probablemente crecerán en número. Para algunos hombres, tales resultados, por sí mismos, serán decisivos. Puedan decir: no sé cómo lo lograron los partidarios de la nueva opinión, pero yo debo aprenderlo; sea lo que fuere lo que están haciendo, claramente tienen razón" (Ibidem, pág 309). Los persuadidos por un paradigma, tanto quiénes mantienen sus reservas o dudas de que los resultados correspondan a los procedimientos como quiénes no dan lugar a dudas de que los resultados correspondan a los procedimientos, se incorporan a la práctica del nuevo paradigma en su afán de comprender cómo se logran los resultados que obtienen los partidarios del nuevo paradigma.

La conversión, a diferencia de la persuasión, es un proceso práctico, en el que el científico no sólo compara los resultados que ofrece cada paradigma a su favor, sino además y sobre todo la manera de hacer ciencia que lleva a unos u otros resultados, más que como espectador, como partícipe. Se trata de un proceso en el que el científico recorre paso a paso el camino o procedimiento que conduce a los resultados en cuestión.

A diferencia de otros valores, los valores que tienen que ver con la medición son valores que no se circunscriben a lo racional, sino que, forzosamente tienen que ver con la experimentación u observación. Si bien en los demás valores los paradigmas también se pueden comparar, se trata de una comparación limitada, de una comparación sólo entre los paradigmas. En esta comparación se deja fuera a la naturaleza como elemento para dirimir la disputa por establecer cuál de los dos paradigmas es mejor. Por el contrario, con los valores de precisión y fecundidad los paradigmas se pueden comparar, a través de sus teorías, no sólo entre sí, sino que además y sobre todo se pueden comparar cada uno de ellos con la naturaleza, con los resultados de la experimentación o con lo que se observa. El hecho de que los paradigmas, a través de sus teorías -o, para rescatar de algún modo el sentido etimológico del término, formas de ver-, se comparen con la realidad, conduce al científico a una situación que no se da en los otros tipos de comparación. En esta comparación, el científico no sólo tiene que llegar a un punto en el que ha de ver lo que su oponente ve cuando dirige su mirada a los mismos estímulos, sino también todo aquello que ello implica. En ese proceso de comparación, el científico ha de aprender, al igual que el estudiante de ciencia, pero en otras circunstancias, a ver el mundo como el oponente lo ve. Desde esta perspectiva, pareciera que, para Kuhn, el sentido de la pugna contra el viejo paradigma, en esta etapa del proceso revolucionario, es el de

que sus simpatizantes dejen de ver el mundo con su forma de ver y acepten verlo, en lo sucesivo, con la forma de ver del nuevo paradigma.

Lo más importante de todo esto es que las imágenes que la naturaleza provoca en el oponente, no son imágenes que se presentan por voluntad, por mero capricho del científico. Son imágenes que provienen de las experiencias de los partidarios del nuevo paradigma, de los instrumentos y procedimientos que el paradigma oponente determina para ello. En la comparación de cifras dadas por uno u otro paradigma, el científico, además de revisar y entender los cálculos que presenta el oponente, ha de realizar las mismas experiencias, los mismos experimentos u observaciones bajo las mismas condiciones, a fin de verificar que los resultados correspondan a los cálculos del paradigma y a sus mecanismos experimentales.

Muy en contra de su voluntad, los partidarios del antiguo paradigma se introducen a la nueva manera de hacer ciencia en la comparación de la precisión y fecundidad de uno u otro paradigma o, como lo indica Kuhn al referirse a la conversión de los partidarios del viejo paradigma, "No ha ocurrido ningún proceso de elección, pero a pesar de ello están practicando ya la nueva teoría" (Kuhn, *La tensión esencial*, pág. 364). La esencia de la revolución científica, o su momento culminante, radica en la conversión, cuando los partidarios del antiguo paradigma han dejado de serle fiel no sólo en mente, sino de hecho; cuando se encuentran practicando la ciencia en el nuevo paradigma. De este modo, la revolución científica, más que ser un proceso de persuasión, es proceso de conversión, donde los valores o argumentos de comparación son, en efecto, los valores decisivos.

CAPITULO 2

EL FENÓMENO DE LA HERENCIA Y LA IDEA DE LA SUSTANCIA GENÉTICA

Uno de los varios fenómenos que el hombre ha percibido e intentado explicar desde tiempos remotos es, sin duda, el fenómeno de la herencia. La existencia de la herencia biológica es evidente en el parecido de los hijos a sus padres. Desde tiempos remotos el hombre ha percibido que, así como un caballo o cualquier otro animal es capaz de procrear individuos de la misma especie, sus hijos no sólo mantienen las características de un ser humano, sino que además tiene rasgos específicos de él como padre. La herencia, pues, desde esta perspectiva, se muestra como un fenómeno en el que se transmiten rasgos del padre al hijo.

Asimismo, desde tiempos remotos, el hombre sabe que la procreación en él y los animales está asociada con el acto sexual; razón por lo cual se asoció, desde los primeros intentos de explicación, el fenómeno de la herencia con el acto sexual y con lo que éste implicaba. Ya en Aristóteles se da una explicación de la herencia que incluye al semen como elemento explicativo. La explicación de Aristóteles, a la que se le conoce como la teoría de la pangénesis, señala que "el semen se produce en todas las partes del cuerpo y llegaba a través de los vasos sanguíneos y de los testículos hasta el pene" (Francisco J. Ayala, Genética moderna, ed. Fondo educativo interamericano, Barcelona 1984, pág. 28). La idea de Aristóteles, a este respecto, es que cada parte del cuerpo reproduce sus rasgos en semen, los cuales, al ser eyaculados durante el acto sexual, son transmitidos al hijo. En contraposición a Aristóteles, August Weismann, en el siglo XIX, propuso la

teoría del plasma germinal. De acuerdo a Weismann los caracteres que presenta el cuerpo no se originan en las diferentes partes del cuerpo; es decir, por ejemplo, la cualidad que tiene el ratón de tener cola no se produce en la cola de los ratones padre. Para Weismann, los caracteres del cuerpo se contienen y autoperpetúan en una sustancia a la que llama plasma germinal.

La explicación del fenómeno de la herencia ha recurrido, desde tiempos de Aristóteles, a entidades sustanciales, esto es, a concebir los factores responsables de la herencia como una sustancia o sustancias. Bajo esta consideración, el papel de la ciencia de la herencia ha sido la de caracterizar a dicha sustancia, es decir, establecer sus diferentes características, sobre todo aquellas que la hacen ser el vehículo de los caracteres que se transmiten. A esta sustancia, a la que habría que ubicar y señalar en sus características, se le dio el nombre de gene (del griego gene que significa "lo que da origen a") y a la ciencia que la estudia genética.

Ante la gran diversidad de organismos vivos que involucra el fenómeno de la herencia, en el que cada individuo, además de mantener rasgos de su especie y progenitores, es único; se impuso la idea de pensar en una sustancia que reuniera en sí los diferentes factores que dan origen a los diferentes caracteres. En el caso de Aristóteles el semen que se eyacula en el acto sexual reúne los diferentes semen que se producen en diferentes partes de cuerpo. En el caso de Weismann los factores que dan origen a los diferentes caracteres se contienen en el plasma germinal, donde se reproducen. Por lo que respecta a la biología molecular, ésta consideraba, antes de que se identificara al ADN como sustancia o material genético, que los genes se encuentran en una macromolécula específica. Antes de que se ubicara a la sustancia genética y pudiera establecer sus diversas características, la idea de que esta sustancia es una estructura molecular

compleja brilló en la mente de los científicos -entre ellos Schrodinger, a quien Staudinger, principal defensor de la teoría macromolecular, leyó con agrado-.

Tanto para Aristóteles como Weismann y la biología molecular en sus inicios, los factores que dan origen a los diferentes caracteres que han de poseer los diferentes seres vivos son, aunque se encuentren juntos formando una sola sustancia, irreductibles uno al otro; es decir, por ejemplo, el factor que da origen al color de los ojos no puede reducirse al factor que da origen al color de la piel. De este modo, cada característica en un ser vivo corresponde a un factor diferente. Ahora bien, en virtud de la gran variedad de caracteres que poseen los organismos complejos, fue natural pensar que la sustancia que los contiene sea compleja en su composición.

Gracias a la teoría evolucionista de Jean Baptiste Lamarck, la cual fue aceptada por el propio Charles Darwin, se pudo acceder a la idea de una sustancia genética común a todos los seres vivos. Para Lamarck, quien adoptó la teoría de la pangénesis como una teoría que explica el proceso evolutivo, la evolución es el resultado de caracteres adquiridos acumulados durante muchas generaciones: las modificaciones corporales adquiridas por el uso y desuso, tal como el desarrollo muscular en las piernas del atleta, pueden ser transmitidas a la progenie si el semen formado en la respectiva parte del cuerpo se modifica conforme a las modificaciones que sufre esta parte del cuerpo. Esto significa que, dada las modificaciones de esta zona del cuerpo, en el semen eyaculado de una persona antes de ser atleta y al ser atleta existe una ligera diferencia, es decir, contiene un semen proveniente de las piernas que se ha modificado. De acuerdo a estas ideas, el hombre, que ha evolucionado del mono, tiene un semen que difiere del semen del mono por una serie de caracteres que se han modificado conforme a las alteraciones que ha

sufrido el cuerpo del mono al dar paso al cuerpo del hombre. Las ideas evolucionistas, pues, inducen a pensar en una sustancia como tronco común de todas las especies vivientes.

Por lo que respecta a la biología molecular, la idea que ésta tiene de la sustancia o material genético, antes de identificarla como ADN, es la de una molécula altamente compleja que, por su complejidad, dé origen a la diversidad de vida que se conoce, tanto a las diferentes especies como a los diferentes individuos. Es decir, en correspondencia a la gran diversidad de individuos y especies vivientes, la sustancia genética se sugería como una molécula altamente diversificante, esto es, con una gran variedad de situaciones, elementos o formas.

Bajo esta idea de sustancia genética, la biología molecular se habría de dar a la tarea de localizar o ubicar, en la realidad, a dicha sustancia. Sin duda alguna, de esta idea habrían de depender, para bien o para mal, los análisis encaminados a identificar al material genético. Dado que esta idea fue fundamental en la búsqueda de la sustancia genética, aun cuando tuvo su lado oscuro en ello, cabe hacer una descripción, en la sección siguiente, de la teoría macromolecular, que fue la teoría que hizo factible a dicha idea.

LA SUSTANCIA GENETICA COMO SUSTANCIA MACROMOLECULAR

Uno de los conceptos que habría de ser clave en el desarrollo de la biología molecular y, por ende, en la búsqueda de la sustancia genética es el de macromolécula. Se trata de un concepto imprescindible en la comprensión de la vida a nivel molecular. De hecho, fue necesario formularlo explícitamente una vez que se adoptó en la explicación de la respiración intracelular. De acuerdo a Eduard Pfluger, "la energía expelida durante la respiración era liberada por la descomposición de las altamente inestables y poliméricas moléculas proteínicas vivas del protoplasma" (Robert Olby, El camino hacia la doble hélice, ed. Alianza Universidad, Madrid, 1991, pág. 34). De ahí que Kekulé, colega de Pfluger, en su obra de 1878 formulara el polimeriano o teoría de la macromolécula en los siguientes términos: "Los distintos átomos de una molécula no están conectados todos con todos, ni todos con uno sino, por el contrario, cada uno está conectado sólo con uno o algunos átomos vecinos, lo mismo que cada eslabón de una cadena está conectado con la siguiente" (Olby, Op. cit., pág. 34).

Según la teoría macromolecular de Kekulé, las macromoléculas son estructuras regulares; esto es, que sus elementos (sean átomos individuales o moléculas simples) se unen o enlazan por los mismos puntos. Esto significa que, si tuvieramos una cadena polimérica formada por el monómero abcd y los monómeros quedarán enlazados mediante el punto d de uno y el punto a del siguiente, tendríamos a lo largo de toda la cadena los mismos puntos de enlace, es decir, una cadena que tendría mas o menos el siguiente aspecto:

abcdabcdabcdabcdabcdabcdabcdabcdabcdabcdabcdabcdabcdabcdabcd...

De acuerdo a esta teoría, el elemento a de un monómero no se puede enlazar con el elemento a, b o c del siguiente monómero.

Para 1916 la teoría de la macromolécula lograría un amplio reconocimiento, que, al mismo tiempo, repercutiría sobre su credibilidad. Para ese año, Emil Fisher reconocía, en el abecedario de las proteínas naturales, treinta aminoácidos como piezas constituyentes de éstas. Ello implicaba que las proteínas estaban constituidas de secuencias distintas de aminoácidos. Sin embargo, para el propio Fisher, "la naturaleza no tenía necesidad de polipéptidos gigantes (es decir, cadenas de aminoácidos gigantes); ello en virtud de que el isomerismo de los polipéptidos pequeños era tan grande. Lo que Fisher tenía en mente es que, si los átomos de una molécula se pueden enlazar de diversas maneras, estos enlaces pueden generar una gran variedad de combinaciones que den cuenta de cada una de las proteínas conocidas. Por ejemplo, una molécula que tenga treinta puntos de enlace, en cada uno de los cuales pueden enlazar treinta átomos diferentes, se obtiene una gran diversa de formas isoméricas, que correspondería a treinta veces multiplicado treinta. Para Fisher, la gran cantidad de moléculas isoméricas que podrían obtenerse con algunos cuantos elementos, era suficiente para explicar la gran diversidad de sustancias orgánicas; razón por la cual, para él, era innecesario que la naturaleza tuviera que recurrir a moléculas gigantes o macromoléculas para generar las diferentes sustancias.

Esta objeción de Emil Fisher a la teoría macromolecular de Kekulé, abrió el paso a la teoría de agregados. Esta teoría de agregados consideraba a las moléculas de peso superior a 5000 como agregados de moléculas mucho más pequeñas. Lo peor del caso es que a estos agregados, según la perspectiva de sus defensores, "no son aplicables leyes ordinarias de la química, como son

las leyes de las proporciones constantes y múltiples y la ley de acción de masas" (Ibídem, pág. 36). Esto, entre otras cosas, implicaba la negación de las ideas de Kekulé respecto al reticulado macromolecular, esto es, cada átomo no está conectado sólo con uno o algunos átomos vecinos, ni cada eslabón de una cadena está conectado sólo con la siguiente. En otras palabras, para la teoría de agregados, las moléculas de alto peso molecular son sustancias amorfas. De ahí que los defensores de esta teoría clasificaran las sustancias en cristaloides (o de moléculas regulares y bajo peso molecular) y coloidales (o de moléculas de alto peso molecular y estructura irregular o amorfa). Es por esta razón, que aquellos que adoptaron esta teoría se sintieron extrañados cuando connotados cristalógrafos obtuvieron diagramas de difracción de rayos X de sustancias que se consideraban coloidales o amorfas.

Pero así como la cristalografía -al obtener diagramas de difracción de sustancias que se suponía carecían de diagrama- desacreditaba a la teoría de agregados y daba la razón a la teoría macromolecular, otros trabajos más vendrían a rescatar la credibilidad de la teoría de Kekulé, entre ellos los trabajos del químico alemán Hermann Staudinger. A Staudinger, más que a ningún otro químico, le correspondería el mérito de haberse mantenido fiel a las ideas de Kekulé y haberlas defendido de las objeciones de la teoría de agregados. Retomando las ideas de Kekulé, Staudinger consideraba a las macromoléculas como cadenas moleculares de determinada longitud, que mostraban una determinada regularidad a lo largo de toda la cadena. La forma alargada que Staudinger atribuyera a las macromoléculas fue un hecho que se constatará en 1916, después de que en 1912 Wiener predijera el fenómeno de birrefringencia positiva "para un sistema de varillas inmersas en un medio de diferente índice de refracción", esto es, la polarización de la luz, que se

hace incidir sobre el sistema de varillas, en dos planos perpendiculares entre sí, y el índice de refracción del rayo extraordinario es mayor que el del rayo ordinario (es decir, que el rayo reflejado y el rayo refractado forman un ángulo de noventa grados aun cuando debieran tener un ángulo menor en virtud del índice de refracción que hay entre la sustancia y el medio en el que ésta está). El que partículas de pentóxido de vanadio, con forma de aguja, presentarían birrefringencia positiva al ser iluminadas, confirmó la línea de pensamiento que habría de seguir Staudinger en su defensa de la teoría macromolecular.

En clara oposición a la teoría de agregados en cuanto a las sustancias coloidales, específicamente respecto a las ideas que no permitían una relación entre la viscosidad de éstas y su concentración, Staudinger establecería una relación entre la viscosidad y la longitud de la cadena molecular. Esta relación, sin embargo, sólo era posible establecerla si se conocía el peso molecular. Es precisamente en este punto donde los estudios ópticos de birrefringencia vendrían a apoyar los trabajos de Staudinger en su concepción macromolecular o polimérica de las sustancias coloidales. Gracias a la birrefringencia era posible determinar la forma general de las sustancias, esto es, formas no especificadas en todos sus detalles. Para la birrefringencia positiva se establecía varillas dispuestas paralelamente al eje de la molécula; en tanto que para la birrefringencia negativa se establecía discos apilados uno sobre otro perpendicularmente al eje de la molécula. De este modo, el que en 1938, en los trabajos de Casparson, el ADN mostrara birrefringencia negativa, delataba que ésta tuviera una forma cilíndrica, "en la que se sugería que los anillos purínico y pirimidínico se encuentran en planos perpendiculares al eje longitudinal de la molécula" (Ibidem, pág. 49), dato que sería una pista en la determinación de la

estructura del ADN por parte de Watson y Crick. Los estudios ópticos de birrefringencia ofrecieron a Staudinger, a diferencia de la técnica de ultracentrifugado, una manera sencilla y económica de determinar el peso molecular, que era una de las condiciones para determinar la longitud de la cadena molecular. El conocimiento del grado de viscosidad de una sustancia, aunado al conocimiento de su forma molecular, permitía establecer el peso molecular. A su vez, el peso molecular, junto con la viscosidad, permitían establecer la longitud de la cadena. El panorama era mas o menos el siguiente:

En el caso de birrefringencia negativa, la forma molecular de la sustancia coloidal era la de discos apilados uno sobre el otro, esto es, su forma era cilíndrica, como la forma que tiene un popote de malteada. Conociendo el ancho o diámetro de esta forma cilíndrica -dato que también lo proporcionaba la birrefringencia-, era posible determinar la longitud del cilindro en base al peso molecular que se mida. Es decir, si, por ejemplo, un popote X que contiene en su interior una cantidad de malteada determinada por la fórmula " $V_x = r h$ -donde r es el radio del popote y h su altura-, un popote Y que tenga la mitad de altura o longitud tendrá la mitad de malteada que X, cantidad que estaría determinada, en este caso, por " $V_y = r h/2$ ". Es claro, pues, que dado dos popotes con características similares pero de longitudes diferentes que se encuentren llenos de malteada, puede determinarse su longitud en base a la cantidad de malteada que contienen. De manera análoga, el peso molecular permitía a Staudinger determinar la longitud de la cadena molecular.

La teoría de la sustancia genética como molécula compleja sólo pudo desarrollarse sin grandes dificultades a partir de 1930 cuando la polémica entre la teoría macromolecular y la teoría de agregados se inclinó a favor de

la primera. Bajo esta perspectiva, la sustancia genética se sugería, a los ojos del científico, como una sustancia altamente diversificante, es decir, como una sustancia con gran variedad de aspectos que, en su combinación, dan origen a la gran diversidad de formas de vida e individuos.

LA SUSTANCIA GENETICA COMO PROTEINA

Todo organismo vivo, desde el más simple (como es el caso de un virus o cualquier otro organismo unicelular) hasta el más complejo (como es el caso del hombre), está compuesto de una unidad fundamental de vida a la que se le conoce como célula; es decir, no existe forma de vida más simple que la célula. En la célula se presentan los rasgos que caracterizan fundamentalmente a todo ser vivo, tales como el nacimiento, el crecimiento, la reproducción y la muerte. No es por ello casual que parte de los estudios genéticos se orientaran, en contraposición a la orientación de la teoría enzimática del gene, a la comprensión de los procesos celulares, específicamente al proceso de división celular y lo que hay detrás de él.

La célula es, propiamente, un organismo vivo, en el sentido de que está constituido por una serie de organelos. Cada uno de los cuales realiza una función específica dentro de la célula. En el centro de ésta se encuentra el núcleo, al cual se le concedió este nombre, no sólo por la posición que ocupa dentro de la célula, sino además, y sobre todo, por la funciones que desempeña en ella. Hacia 1880, el biólogo alemán, Walther Flemming, descubrió que el núcleo está constituido de una sustancia rojiza, que destacaba sobre el fondo incoloro, a la que denominó cromatina, la cual a su vez se compone de una serie de filamentos a los que se les llamó cromosomas (del griego *chromo* que significa color y *soma* que significa cuerpo). En estos mismos estudios de Flemming se estableció que, durante el proceso de división celular, los cromosomas realizan una variedad de movimientos que sugirieron,

desde entonces, su importancia en dicho proceso. Durante una de las primeras etapas del proceso de división celular, los cromosomas se agrupan en pares. En una etapa intermedia, poco antes de que la célula se divida, estas parejas de cromosomas se separan y cada uno de los cromosomas de estas parejas se traslada a costados opuestos de la célula. Una vez ahí, cada cromosoma reproduce a su pareja justo en el momento que la célula se divide; lo cual significa que cada uno de los costados divididos constituye una nueva célula con el mismo número de cromosomas que la célula de la que partieron. Son estos los hechos en los que se basa la teoría cromosómica del gene. Partiendo del hecho de la replicación de la célula y el papel que juega en ella los cromosomas, la teoría cromosómica del gene ubica a la sustancia o material genético dentro de los cromosomas.

"Los cromosomas son filamentos intracelulares de función específica y de constitución variable, que están de acuerdo con la morfología y organización de cada ser vivo" (Llera Domínguez E., Temas para un futuro biólogo, ed. Dirección General de publicaciones de la UNAM, México, D.F., 1984, pág. 478). Sin embargo, todo cromosoma, independientemente de su forma o proporciones de contenido, está constituido, invariablemente, de dos sustancias: 1) Proteína, y 2) ácido desoxirribonucleico (ADN). En vista de que el ADN, en su estado natural, se encuentra ligado a la proteína cromosómica, su identificación como material genético hubo de pasar por una serie de dificultades, entre las que destacan fundamentalmente dos: 1) la idea previa de sustancia genética que habría de favorecer, como veremos a continuación, a la proteína como material genético, 2) las limitaciones técnicas para aislar al ADN de la proteína sin desnaturalizarlo, que imposibilitaron observarlo en su comportamiento aislado, esto es, observar cuál era su comportamiento sin la proteína a la que está asociado. A la

conjugación de proteína y ADN, en el cromosoma, se le dio el nombre de nucleoproteína, tan sólo para destacar la importancia que se le concedía a la proteína en los filamentos nucleares.

Sin duda, la presencia de una idea previa de sustancia genética, predispondría los análisis encaminados a distinguir los aspectos cualitativos de las sustancias nucleoproteínicas. En virtud de que en aquella idea no se caracteriza al material genético por una cualidad sustancial específica -como por ejemplo, tener fósforo u otro elemento específico-, no quedaba más que indagar el aspecto o aspectos que se sugerían en ella. La tarea, pues, era la de analizar los diversos aspectos cuantitativos del ADN y la proteína, a fin de compararlos y establecer las proporciones de una respecto a la otra; en la que la sustancia con mayores proporciones cuantitativas, por tener una cercanía mayor a la idea de molécula altamente compleja -que se asocia con la idea de gen-, adquiriría el título de material genético.

En efecto, la idea de la proteína como material genético -a la que Robert Olby llama el dogma central en su versión proteínica (Vid Olby, op. cit., págs. 605-607)- se suscitó a partir de los análisis que distinguían u observaban una mayor cantidad de proteína, frente a una menor cantidad de ADN, en los cromosomas. Pero además de éste, otros dos análisis más habrían de fortalecer esta idea en el mismo sentido: 1) los análisis que mostraban la naturaleza cien por ciento proteínica de los enzimas, y 2) los análisis que mostraban un alto contenido de proteína en virus y bacteriófagos. Estos tres análisis, además de distinguir de común la presencia evidente o en mayor cantidad de proteína en cada uno de estos tres tipos de entes biológicos, delataban un comportamiento similar, en términos generales, en ellos. Esto es, más allá de que los cromosomas se dupliquen durante el proceso de mitosis, los enzimas catalicen o produzcan otras sustancias orgánicas y los

virus se reproduzcan o multipliquen al infectar bacterias, está el hecho de que cada uno de estos tres entes biológicos mostraba una actividad productiva; una actividad productiva que era similar a la actividad genética que se sugería en la idea de gene, que, conforme a su etimología, es la de dar nacimiento a un otro.

De hecho, en vista de que algunos enzimas están relacionados con algunos aspectos visibles del organismo, como por ejemplo el color de piel u ojos en el hombre, en 1945 se formularía, por parte de Beadle, la teoría que concebía a los enzimas como genes. Esta teoría afirma que hay un enzima para cada gene. Sin embargo, la teoría enzimática del gene, por correctos que fueran sus resultados, no lograría impactar a la comunidad científica en vista de que se le consideró como una nueva versión de la teoría de la pangénesis de Aristóteles, la cual ya para entonces se había superado. Aun cuando la teoría enzimática del gene estaba de conformidad con el cauce de ideas que indicaban a la proteína como sustancia genética, sería eclipsada por la teoría cromosómica del gene (o teoría que ubica al gene dentro de la sustancia nucleoproteínica del cromosoma), la cual, además de estar en el mismo cauce de ideas, tenía la virtud de no ser una visión pangenética de la vida. Dado que no era posible identificar como sustancia genética a aquella sustancia que estuviera asociada a la actividad productiva de dar nacimiento a otros y que estuviera presente en mayor cantidad (pues las técnicas para aislar ambas sustancias nucleoproteínicas y observarlas separadamente en su comportamiento eran toscas y, además, el hecho de que una de ellas estuviera presente en mayor cantidad no significaba que fuera más compleja), el problema de la identificación de la sustancia genética habría de considerar otros aspectos del ADN y la proteína que pudieran cuantificarse, a fin de identificar como

sustancia genética a aquella sustancia que mostrara mayores ventajas cuantitativas.

Otros análisis mas de carácter cuantitativo, que habrían de concluir en señalar a la proteína como material genético, son los que se dirigieron -por decirlo de alguna manera- a las partes inmediatas del ADN y la proteína, esto es, las moléculas que constituyen a cada una de estas macromoléculas. En tales análisis se establecía que el ADN está compuesto de cuatro nucleótidos y la proteína de por lo menos veintidos aminoácidos, esto es, que el número de partes del ADN es menor al número de partes de la proteína. En esta situación, sin duda, la proteína se mostraba como una sustancia mucho más compleja y diversificante que el ADN. Así pues, por ejemplo, veinte aminoácidos diferentes combinados en veinte posiciones diferentes, en una cadena de veinte eslabones, generan 240000000000000000 (dos trillones cuatrocientos mil millones) de combinaciones; en cambio, cuatro nucleótidos diferentes combinados en las mismas veinte posiciones diferentes generan un poco mas de un mil cien millones de combinaciones (1100000000). Si cada una de las combinaciones anteriores correspondiera a un individuo diferente, evidentemente la proteína daría una diversidad mayor de ellos, que era precisamente uno de los hechos que se buscaba explicar con el material genético como molécula compleja. Al igual que los análisis de cantidad de contenido, los análisis de cantidad de partes mostraban a la proteína como una sustancia mucho más compleja y diversificante que el ADN y, por lo tanto, como la sustancia más viable de ser el material genético.

Un tercer tipo de análisis cuantitativo, que en parte habrían de apoyar la idea de la proteína como sustancia genética, fueron los que se realizaron con el fin de determinar las magnitudes del ADN y la proteína, esto es, determinar la longitud de las cadenas moleculares de una y otra sustancia. En

estos análisis, al igual que los anteriores, la proteína mostraba ventajas sobre el ADN. De hecho, para cuando se reconoce al ADN en 1938 como una sustancia de naturaleza macromolecular, ya para entonces la proteína tenía algunos años de reconocerse dicha propiedad. Antes de 1938 la molécula de ADN era considerada, por parte de la teoría tetranucleótida de Levens, como una molécula de pequeñas proporciones, una molécula integrada de tan sólo cuatro nucleótidos en su composición intramolecular. Ante las grotescas técnicas de separación del ADN, del resto de la sustancia nucleoproteínica, el ADN quedaba como una sustancia de ínfimo tamaño molecular.

En todos estos tipos de análisis, la percepción que se forjaba del ADN era la de una sustancia menos compleja y diversificante que la proteína. En dicha percepción quedaba anulada la posibilidad de ver a este ácido nucleico como la sustancia genética. Las ventajas que presentaba la proteína en estos análisis, la harían el candidato más viable a ser la sustancia genética. La imagen que se tuvo de la proteína como sustancia genética, a consecuencia de la mayor complejidad molecular frente al ADN, y que se mantuvo hasta principios de la década de los cincuenta, es lo que, en la reconstrucción kulreana del descubrimiento de la estructura del ADN que intentamos en el siguiente capítulo, describimos como el paradigma de la proteína como sustancia genética.

LA RESISTENCIA A CONSIDERAR EL ADN COMO SUSTANCIA GENÉTICA

De no haber sido por la intervención de otras disciplinas en el estudio de la sustancia genética, la identificación de ésta hubiera tardado, seguramente, algunos años mas. Por sí sola, la ciencia de la biología molecular se ataba a la idea de la sustancia genética como proteína, con la evidencia que mostraba a esta sustancia como una entidad molecular altamente compleja. Sólo la participación de otras disciplinas como la citología y la medicina, entre otras, habría de eximir a la biología molecular de su creencia de considerar a la proteína como el material genético. En este sentido, los estudios en bacteriología habrían de ser decisivos en la identificación de la sustancia genética.

Uno de los primeros pasos que se habría de dar a este respecto fue la serie de datos que arrojaban los estudios de la estructura de los virus. De acuerdo a estos estudios, los virus mostraban una naturaleza similar a la de los cromosomas, esto es, al igual que éstos, mostraban una composición nucleoproteínica. Sin duda alguna, la composición de proteína y ácido nucleico de los virus abriría una nueva línea de investigación, en la que se consideraba al virus como una entidad análoga al gen. Así lo sugieren los estudios que se realizaran poco después de que en 1937 Stanley proclamara que "las proteínas víricas aisladas hasta el momento han resultado ser nucleoproteínas" (Ibidem, pág. 246).

En estos estudios, en los que se empieza a vislumbrar un reconocimiento de la participación genética del ácido nucleico, algunas de las

características reconocibles del virus se podían correlacionar con la sustancia nucleoproteínica. Es decir, dado que los virus son organismos sencillos, que no presentan una gran cantidad de aspectos, podía detectarse el cambio de alguno de sus aspectos en la manipulación de su sustancia nucleoproteínica. El virus, al igual que cualquier otro organismo vivo, al reproducirse, transmite sus características a su descendencia y, al ser fundamentalmente nucleoproteína como los cromosomas, se le consideró por ello, por analogía, como un sistema genético, esto es, como un sistema de genes. La relevancia de esta línea de investigación radicaba básicamente en la posibilidad de reconocer a la sustancia responsable de la herencia por su propia función genética. Es decir, era posible afectar la sustancia nucleoproteínica o alguna de sus partes (ya fuera la parte proteínica o la parte de ácido nucleico), a fin de establecer a cuál de ellas correspondía la función genética. Esto significaba que, cualquiera que fuera la sustancia genética, al ser afectada, traería consigo alguna alteración en alguno de los aspectos del virus. De este modo, si el virus sufría alguna alteración en alguno de sus aspectos al afectar su parte proteínica, significaba que ésta era la sustancia genética; y si la alteración estaba asociada a la afectación del ADN, entonces éste sería el material genético. A este respecto, el principal reto era el de desarrollar técnicas que permitieran o bien aislar al ácido nucleico de la proteína -o viceversa- y observar la función que manifestara cada uno por separado o bien afectar una de las dos sustancias nucleoproteínicas, sin afectar a la otra, y, de este modo, observar lo que sucede tanto para el caso de la proteína como para el caso del ADN.

Sin embargo para entonces, a pesar de los resultados que arrojaban estudios como los de Pfenkuch, Kausche y Stubble, en los que se delataba una activa participación del ácido nucleico en la mutación de algunos aspectos de

los virus como sus copias, el aceptar que el ADN fuera la sustancia genética era una situación un tanto prematura. Sobre todo porque para finales de los años treinta y principios de los cuarenta había una gran cantidad de evidencia a favor de la alta complejidad de las proteínas. Aunado a ello, no había pasado mucho tiempo desde que el químico de origen ruso, Lavern, en 1938, reconociera la naturaleza macromolecular del ADN.

Entre los experimentos que se habrían de realizar con el propósito de aislar el comportamiento del ADN y la proteína, pero que habrían de tener la misma suerte que estudios de Pfankuch, Kausche y Stubbs, se encuentran aquellos que perseguían inactivar o provocar una mutación en los virus, en los que se seleccionaba mutágenos o inactivadores que afectaran solo a una de las dos partes de la sustancia nucleoproteínica. A este respecto, uno de los experimentos cuyos resultados habrían de sorprender a sus diseñadores y ejecutores es el que pretendía inactivar al virus del mosaico de Aecuba, mejor conocido como VMT, utilizando para ello ácido nitroso, al cual se seleccionó para afectar a la parte proteínica del virus. El ácido nitroso lograba en efecto inactivar al virus, pero, contrariamente a lo esperado, no afectaba a la proteína, sino al ácido nucleico. Dentro de esta misma categoría de experimentos, los que delataban de una manera más inequívoca la participación activa del ADN en la función genética son aquellos en los que se utilizó como mutágeno a la radiación ultravioleta. En estos experimentos se "reconocía que la acción bactericida de esta radiación está asociada a la absorción máxima de los constituyentes del ácido nucleico" (Vid Ibidem, pág. 249). Esto es, que átomos de la molécula de ADN absorben la luz ultravioleta que produce una mutación en el virus. Si bien los resultados de estos experimentos mostraban al ADN como una sustancia relacionada al fenómeno de la mutación y, por ende, al material genético; ello no significaba que fuera

ella misma el gen. En una atmósfera donde predominaba el punto de vista de considerar a la proteína como la sustancia genética, los resultados experimentales que sugerían una actividad genética del ADN debieron tomarse con cautela, es decir, de tal manera que no se pusiera en tela de juicio al paradigma de la proteína como sustancia genética. De ahí que, por ejemplo, ante la acción bactericida de la radiación ultravioleta, se sugiriera, en la hipótesis de transferencia de energía, que el ácido nucleico absorbía esta radiación pero que la transfería a la parte proteínica de la sustancia nucleoproteínica. Con esta hipótesis se lograría, como podrá verse en la sección 3 del capítulo 3, reconocer un papel genético del ADN sin poner entredicho la imagen que se tenía en el paradigma de la proteína como sustancia genética, que es la de percibir a la proteína como la sustancia responsable de las funciones genéticas fundamentales.

La identificación de la sustancia genética como ADN, sin duda, es un acontecimiento científico que se logró no sólo de una manera cautelosa, sino además de manera gradual. En un primer momento, el ADN fue una sustancia insignificante para el bioquímico; en un segundo momento pasa a ocupar un lugar junto a la proteína, pero en una función secundaria. Y finalmente se le identifica como la sustancia genética. En las siguientes dos secciones describiremos dos de las investigaciones que contribuyeron a la identificación de la sustancia genética como ADN.

LA IDENTIFICACION DE LA SUSTANCIA TRANSFORMADORA

Entre los experimentos con virus o bacterias que sugerían una participación activa del ADN en el fenómeno de la herencia, los de transformación bacteriana son los que mayor relevancia tuvieron en la identificación del material genético. Los estudios de las transformaciones bacterianas se iniciaron a finales de los años veinte con Federic Griffith. Gracias a los criterios de clasificación de bacterias del bacteriólogo británico J. A. Arkwright, por medio de los cuales era posible distinguir a simple vista entre bacterias virulentas y no virulentas, se tendría bases para estudiar y establecer el fenómeno de la transformación bacteriana. Las virulentas, de acuerdo a los criterios de Arkwright, presentan las características de ser lisas, abovedadas y regulares. Las no virulentas, por el contrario, son granuladas, planas e irregulares. A las primeras Arkwright las denominó bacterias de forma S; en tanto que a las segundas las denominó bacterias de forma R. Aplicando estos criterios al neumococo, que es la bacteria que provoca la neumonía, Griffith llegaría en 1928 a contradecir la teoría de las especies bacterianas constantes de Robert Koch, después de obtener los resultados del siguiente experimento: al inyectar células vivas de la forma R tipo I en un ratón, junto con células muertas por calor de la forma S del tipo II; Griffith logró aislar colonias de la forma S del tipo II de la sangre del ratón que había sucumbido a la infección. En vista de que no era nada posible que las células de la forma S del tipo II volvieran a la vida y se reprodujeran; Griffith concluía que las células de la forma R del tipo I se habían transformado en la forma S del tipo II.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Sin embargo, estos resultados por sí solos no habrían logrado aportar su granito de arena a la identificación del material genético de no haber sido por la introducción del concepto de mutación a la explicación de la transformación bacteriana. De este modo, las transformaciones bacterianas se entendían como un caso específico de mutación. Sin duda alguna, la relevancia de explicar la transformación bacteriana en términos de mutación radicaba, para la genética, en que salía a relucir el material genético, es decir, con ello se asocia la transformación bacteriana a la sustancia genética.

En este contexto, se observaba que, durante el proceso de transformación, los neumococos vivos segregan sustancias solubles en el organismo anfitrión y que la cantidad liberada parecía guardar relación con la cantidad de material capsular que rodeaba al neumococo, material capsular que tiene que ver con las características rugosa o lisa de las formas R y S, respectivamente. En este sentido, Griffith abrazaba la "idea de que dentro de cada especie hay características como el tipo de cápsula polisacárida sujetas a mutaciones en respuesta a las condiciones ambientales" (Cfr. *Ibidem*, pág. 270). La sustancia soluble responsable del material capsular, de acuerdo a la explicación de Griffith, tiene la función de ser un estímulo que determina el tipo de transformación que ha de tener la bacteria, la cual, según el propio Griffith, tiene la capacidad de adoptar cualquiera de las formas o tipos de bacterias: "las células receptoras conservan la capacidad de elaborar el polisacárido de varios tipos serológicos de bacterias y sólo necesitan el estímulo específico del principio transformador" (*Ibidem*, pág. 278). Por su capacidad de inducir cambios en las células receptoras, a la sustancia soluble se le denominó sustancia transformadora.

A pesar de que el mecanismo de transformación de las bacterias no fue explicado correctamente por Griffith, su aportación a la identificación del

material genético radicaría fundamentalmente en haber suscitado el desacuerdo de sus contemporáneos a la transformación bacteriana y, con ello, a lo que hay detrás de ella, incluyendo la manera de operar de la sustancia transformadora, entre los que se encontraban aquellos que lograrían identificar la parte activa o genética de la sustancia transformadora.

En reacción a los resultados y conclusiones del doctor Griffith, el inunoquímico norteamericano Avery y su equipo, en los últimos años de la década de los veinte, asumirían el reto de verificar los pasos del famoso experimento del doctor inglés, con la esperanza de encontrar alguna falla. Sin embargo, contrario a lo esperado, el equipo de Avery confirmaría los resultados del experimento de Griffith. Confirmada la transformación bacteriana, el hecho que aguardaba a ser descifrado, a los ojos de Avery, era la manera cómo la sustancia transformadora opera químicamente en la transformación, esto es, lograr una explicación estrictamente química de la transformación bacteriana, para lo cual era fundamental caracterizar a la sustancia transformadora. De este modo, durante la década de los treinta, el determinar las cualidades o componentes químicos de la sustancia transformadora se volvió una prioridad para la ciencia de la inunoquímica.

Para entonces se sabía, por estudios de transformación bacteriana realizados en 1929 por Dawson y Sia, que la sustancia transformadora presentaba dos partes: "Una termolábil que reacciona al suero inmune, y otra termolábil susceptible al ataque de los enzimas bacterianos" (Ibidem, pág. 275). De estas dos partes, se establecía que la termolábil es la encargada de producir anticuerpos, es decir, la parte activa en el proceso de transformación bacteriana. Bajo estas consideraciones, en 1933, se logró, por parte de Lionel Alloway, la transformación sin células. Esto es, se liberaron los contenidos de las células neumocócicas y se aislaron mediante técnicas

del filtrado, a fin de establecer si alguna de las sustancias aisladas era capaz de inducir cambios en las bacterias. En los experimentos de Alloway, una parte del contenido extraído de las células neumocócicas era tan activo en la transformación como las células neumocócicas intactas.

En este punto, la participación de Avery en la historia del descubrimiento del papel genético del ADN, fue la de determinar la identidad química de la parte termolábil y activa de la sustancia transformadora. A este respecto, las técnicas de las que se valió Avery fueron fundamentalmente tres: 1) Precipitación, 2) Fraccionamiento, y 3) Caracterización enzimológica.

Mediante el empleo de alcohol etílico absoluto, Avery, al igual que Alloway, logró precipitar la parte activa de la sustancia transformadora, con lo cual lograba separarla del resto de la sustancia transformadora o nucleoproteínica, quedando en el fondo de ésta. Posteriormente, a la parte precipitada, en la técnica de fraccionamiento, se le "añadió alcohol lentamente hasta alcanzar una concentración crítica, con la consecuencia de que el material activo se separa —de las impurezas— en forma de hebras fibrosas que se enrollan alrededor del bastoncito en cuestión" (Vid *Ibidem*, pág. 278). Cuando se analizó, por parte de Avery y su equipo, esta sustancia fibrosa se percataron de que era ADN. El paso siguiente, por parte de Avery, fue someter a cada una de las partes separadas —no sólo al ADN, sino también al resto de la nucleoproteína— a la acción de enzimas específicos que las desnaturalizan o destruyen. A estas sustancias se les conoce como despolimerasas, en virtud de que descomponen las moléculas de los polímeros. Para los años cuarenta, se conocía, por estudios de Levene una década antes, un enzima proveniente de un extracto intestinal que despolimeriza al ADN. Al aplicar este enzima a la sustancia activa de la sustancia, Avery y sus

colaboradores notaron que destruía la actividad de la sustancia transformadora. Las despolimerasas como la tripsina, la quimotripsina y la ribonucleasa, que despolimeran a la proteína nucleoproteínica y al ácido ribonucleico, respectivamente, no lograron desactivar a la sustancia transformadora; razón por la cual se concluía, por parte de Avery, que era el ADN la sustancia activa de la sustancia transformador.

Sin embargo, a pesar de que con estos resultados se determinaba, en 1944, la identidad del material genético, hubieron de pasar ocho años mas para desaparecer todo vestigio de duda entorno al trabajo de Avery, durante los cuales hubo de acumularse más pruebas. El reconocimiento tardío del descubrimiento de Avery, más que haber sido un signo de desconfianza hacia la preparación química de este científico, pues como inunoquímico su preparación era más la de un médico que la de un químico, es una clara muestra de que en la ciencia no se acepta una nueva visión acerca de lo que se estudia, a menos que haya la suficiente evidencia que desacredite a la visión que se venía manteniendo hasta entonces. La fuerte creencia de que la proteína era la responsable de la función genética obligaría, durante los siguientes años a 1944, a acumular mas pruebas que permitieran aceptar el descubrimiento de Avery como tal. Pero más aún, la tardía aceptación del descubrimiento de Avery, a juzgar por la reconstrucción kuhneana que de él intentamos hacer en la sección 3 del capítulo 3, se debe a que fue un descubrimiento imprevisto, una anomalía en contra del paradigma de la proteína como sustancia genética. El descubrimiento de Avery no se aceptaría como tal hasta que no triunfara, en una prolongada batalla, el nuevo paradigma del ADN como sustancia genética.

EL EXPERIMENTO HERSHEY-CHASE

En 1952, ocho años después de que Avery identificara a la parte activa de la sustancia transformadora (o sustancia genética) como ADN, los bioquímicos Alfred Hershey y M. Chase habrían de desarrollar un experimento que, en la historia de la caracterización del material genético como ADN, se considera como crucial. En compatibilidad con el descubrimiento de Thom Anderson en relación al choque osmótico, el descubrimiento de Harriott abría a Hershey un horizonte promisorio de experimentos que delatarían de una manera más clara la identidad del material genético. De acuerdo a los experimentos de Harriott, los bacteriófagos, que es una variedad de virus que infesta las células bacterianas, se comportan como jeringuillas hipodérmicas llenas del principio transformador o lo que en el lenguaje de Avery se denominaba como la parte activa de la sustancia transformadora: "el virus como tal nunca penetra en la célula; sino que solamente su cola en contacto con la anfitriona y quizá recorta enzimáticamente un pequeño orificio en la membrana externa y después es el ácido de la cabeza del virus el que fluye hasta el interior de la célula" (Vid Ibidem, pág. 452).

En base a estos hechos, el experimento de Hershey y Chase fue diseñado a fin de determinar la identidad de la sustancia que el virus inyecta, con la que induce su reproducción dentro de la bacteria. Entre los ácidos nucleico y las proteínas existe una diferencia fundamental en la que habría de basarse la identificación del principio transformador o sustancia genética: El ADN y el ARN, a diferencia de la proteína, posee como parte relevante de su

composición química fósforo, elemento que determina sus propiedades de ácido; en tanto que la proteína posee azufre, elemento del que carecen los ácidos nucleico. De este modo, el objetivo del experimento de Hershey y Chase fue el de establecer si la sustancia inyectada se componía de fósforo o azufre. Si contenía fósforo, significaba que el principio transformador era ADN. Y si contenía azufre, significaba que era proteína. La identificación de la sustancia que se inyectaba a la bacteria, por parte del virus, se realizó mediante el uso de átomos de fósforo y azufre radiactivos como marcadores, de la siguiente manera:

1) Se cultivaron bacterias en un medio que contenía átomos de azufre y fósforo radiactivos. Estos átomos, en tanto que se comportan como los átomos de azufre y fósforo corrientes, eran asimilados por las bacterias dentro de su estructura.

2) Se infestaron las bacterias cultivadas con bacteriófagos, con el propósito de que éstos últimos se reprodujeran tomando como base las células de las bacterias marcadas con los átomos de fósforo y azufre radiactivos. La finalidad de ello era marcar los bacteriófagos, a fin de que el fósforo y el azufre radiactivo quedaran asimilados, respectivamente, al ADN y la proteína de éstos, como en efecto sucedió en el experimento de Hershey y Chase.

3) Se infestaron bacterias normales no marcadas con bacteriófagos marcados, provenientes del anterior paso; a fin de establecer si era su ADN o su proteína la sustancia que se inyectaba. La sustancia que se detectó al interior de las bacterias normales, y que reprodujo al interior de éstas a los bacteriófagos invasores, fue el ADN.

De acuerdo a esta observación, se concluía en 1952, por parte de Hershey y Chase, que la sustancia descubierta por Federich Miescher en 1869 era la responsable de guardar y transmitir la información genética. Si bien unos

cuantos años antes James Watson realizó experimentos análogos a los de Hershey y Chase, que apoyaban de una manera menos equívoca los resultados logrados por Avery en 1944; en la historia de la identificación del material genético no puede desdeñarse la influencia que tuvieron los trabajos de Hershey y Chase en la competencia que habría de desatarse en la búsqueda de la estructura del ADN. Se trata, como veremos en la sección 3 del siguiente capítulo, de trabajos de ciencia extraordinaria en la biología molecular que pretendieron respaldar al viejo paradigma que se tambaleaba, pero que, por llegar a la conclusión opuesta a la que pretendía, le restaron fuerzas y, por ende, fortalecerían al nuevo paradigma. Este fortalecimiento del nuevo paradigma repercutiría en el ánimo de Watson y Crick por disputar, por un lado, a Pauling el honor de hallar la estructura de una sustancia que cada vez más se vislumbraba como el material genético y, por otro lado, dar —por lo que se verá en la siguiente sección de este capítulo— un argumento más que respaldara las conclusiones del trabajo de Avery.

LA ESTRUCTURA COMO RECURSO PARA IDENTIFICAR LA SUSTANCIA GENETICA

Ningún otro acontecimiento científico influyó tan determinadamente en la búsqueda de la estructura del ADN como la identificación del material genético. El descubrimiento de la estructura del ADN no fue una mera curiosidad científica; esto es, a partir de 1952 la búsqueda de la estructura del ADN contaría con el respaldo de un buen cúmulo de datos que indicaban que se trataba de una sustancia orgánica de suma importancia para la vida, nada menos que de la sustancia encargada de organizar cualquier forma de vida. De no ser por toda la evidencia acumulada durante aproximadamente una década, que indicaba que el ADN era la sustancia genética, el estudio de la estructura de esta sustancia no habría adquirido la relevancia que adquirió para la biología molecular en los primeros años de la década de los cincuenta.

Sin embargo, sería injusto afirmar que la búsqueda de la estructura del ADN se inició sólo porque esta sustancia delataba una función relevante a los ojos de la biología molecular. Sin duda esta fue una de las razones de peso, pero no la única. Aunado al deseo humano de vestirse de gloria -de lograrse determinar la estructura del ADN-, se dio el convencimiento científico de corroborar lo que sugerían los experimento de Avery mediante la estructura molecular de la sustancia en cuestión. De acuerdo a James Watson, "fue ese convencimiento lo que hizo que Salvador Luria le enviara a Copenhague, con el propósito de que aprendiera química estructural del ADN" (Vid Watson James, La doble hélice, ed. Plaza and Janés, Barcelona 1978, págs. 37-39). El

interés por determinar la estructura del ADN no obedeció, pues, simple y llanamente al deseo de hacer un descubrimiento importante -por tratarse de una sustancia importante-; sino que además, y sobre todo, obedecía a una línea de investigación que se venía gestando desde antes que en 1952 Hershey y Chase dieran a conocer los resultados de sus experimentos.

Ante la difícil situación de determinar cuál de las dos sustancias nucleoproteínicas era la portadora de la función genética -con toda la evidencia apuntando hacia el ADN pero con la todavía fuerte creencia en la proteína-, el problema de la identidad de la sustancia genética habría de abordarse desde otros frentes. El estudio de la estructura del ADN representaba, en esta situación, un frente más desde el que se intentaría establecer la identidad del material genético.

De acuerdo a esta línea o frente de investigación, en la naturaleza se da una correspondencia entre la estructura molecular de una sustancia y la función que ésta manifiesta, como puede apreciarse en las siguientes palabras de Watson: "Luria se preguntaba a menudo si la solución real llegaría sólo después de haber sido desvelada la estructura química de un virus, es decir, un gene. En lo más íntimo, sabía que es imposible describir el comportamiento de algo cuando no se sabe qué es" (Watson, op. cit., pág. 37). Era de esperar, bajo esta perspectiva, que la estructura química de la sustancia genética delatará sus diferentes aspectos, entre éstos su función genética o capacidad de reproducirse.

Sin embargo, ante el peso que adquirieron los resultados del experimento de Hershey y Chase -que venían a apoyar los resultados logrados por Avery en 1944 y los que se habrían de obtener durante los siguientes ocho años-, el conocimiento de la estructura del ADN se convertiría en la prueba más contundente a favor o en contra de lo que hasta ese entonces sugerían los

resultados de los diversos experimentos encaminados a identificar la sustancia genética. En estas circunstancias, cualquiera que fuera la estructura que se hallara, habría de contener en sí la explicación de las principales funciones genéticas. De ahí que Watson, a este respecto, considere la importancia de estudiar la estructura del ADN en los siguientes términos: "Así pues, trabajar sobre la estructura química del ADN podría ser el paso esencial para descubrir cómo se duplicaban los genes" (Ibidem, pág. 38). A partir de 1952, la búsqueda de la estructura del ADN representaría la posibilidad de lograr el viejo objetivo de la genética de materializar el concepto de genes, esto es, no sólo indicar una sustancia como genes, sino además, y sobre todo, indicar su forma material. Pero sobre todo representaría la posibilidad de lograr un argumento mucho más convincente a favor del nuevo paradigma; un argumento que habría de lograr, de hecho -como intentaremos establecerlo en la última sección del siguiente capítulo-, lo que cualquier otro argumento a favor del nuevo paradigma pretendía: Persuadir de la plausibilidad de la nueva forma de ver a la sustancia genética y convertir, con ello, a la mayoría de la comunidad de biólogos moleculares a la práctica del nuevo paradigma, es decir, a culminar la revolución iniciada con los trabajos de Avery.

LA CRISTALOGRAFIA Y LA DIFRACCION HELICOIDAL

Cualquier relato que se haga de la historia del descubrimiento de la doble hélice del ADN no puede prescindir del papel que jugó en ello la cristalografía de rayos X. Su participación de hecho se puede calificar de fundamental y decisiva en la determinación de la estructura del ADN. Sin duda, el uso de la cristalografía, era el paso obligatorio que habría de dar cualquiera que pretendiese desentrañar la estructura molecular de cualquier sustancia. Más aun, desde que el notable cristalógrafo inglés Bernal destacó el valor de la cristalografía en el estudio de la biología, el estudio cristalográfico se volvió una herramienta de propiedad común para quienes laboraban dentro de la biología molecular.

Pero las bondades de la cristalografía de rayos X, en el estudio molecular de las sustancias, datan de los primeros años de la década de los diez del siglo XX cuando el físico alemán Max von Laue destacara la posibilidad de que las sustancias de naturaleza cristalina se comporten como difractores de rayos X, es decir, sean capaz de provocar la difracción de los rayos X, la cual quedaría descrita por los principios generales de la difracción establecidos por Jean Augustin Fresnel durante el siglo XIX.

La difracción, en cuanto fenómeno físico o, específicamente, en cuanto fenómeno óptico, es "la desviación de la luz en torno a un obstáculo como, por ejemplo, la orilla de una rendija" (Resnick Robert, Física, Vol. II, ed. DECSA, México 1965, pág. 485). En esta noción de difracción, que ya se encuentra en los estudios de Fresnel, se deja entrever una gama de aplicaciones científicas esperando a que den las condiciones fácticas,

teóricas y técnicas para que se realicen. Por lo que respecta al desarrollo de la cristalografía de rayos X, fue necesario, por un lado, el descubrimiento de los rayos X y, por otro, entender que en la naturaleza existen condiciones que hacen posible la difracción de este tipo de radiación. La cristalografía de rayos X se desarrolla, precisamente, como una técnica óptica que proporciona información de la estructura molecular de los cristales en tanto que en la propia teoría de la difracción de los rayos X se establecen como condiciones de su difracción la regularidad molecular de los cristales. Al confirmarse que los rayos X eran difractados por las sustancias cristalinas nació la cristalografía como la aplicación de la difracción de rayos X al estudio de la estructura molecular de los cristales. Aunque estas bondades de la difracción de rayos X en el estudio de los cristales se encuentran implícitas en el trabajo de Laue, correspondería a William y Lawrence Bragg, padre e hijo respectivamente, haber desarrollado los principios teóricos que habrían de dirigir a la cristalografía en su exploración de la estructura molecular de las sustancias cristalinas. Precisamente Lawrence Bragg habría de consolidar una sólida escuela de cristalografía dentro de la cual se educarían distinguidos personajes de la historia de la estructura del ADN, tales como Francis Crick, Rosalind Franklin y Maurice Wilkins.

La manera de proceder de la cristalografía se encuentra claramente descrito en el siguiente comentario que hace William Bragg al experimento de Laue: "El planteamiento era bien sencillo. Se trataba de mandar un delgado haz de rayos X a través de un cristal y de recibirlo sobre una placa fotográfica al otro lado del cristal. Laue suponía que además de la imagen principal de la placa, que sería causada por la incidencia del haz de rayos, podían impresionarse otras imágenes subsidiarias. Esta suposición

la basó en la consideración de otros efectos de esta clase, como el que ocurre en el caso de los rayos de luz. Cuando un tren de ondas de éter cae sobre una placa en la que han trazado líneas paralelas, o se transmite a través de una placa así, o pasa a través de una atmósfera en la que están suspendidas partículas muy finas, se presentan desviaciones regulares de energía en varias direcciones formando haces difractados" (Bragg W. "Los rayos Rontgen", en Sigma, el mundo de las matemáticas, ed. Grijalbo, Barcelona 1985, pág. 135). De acuerdo a esto, el propio Williams Bragg concluye que "Cada cristal escribe su propia firma" (Bragg, op. cit., pág. 148). La idea con la que nace la cristalografía es la de que la distribución regular de los átomos o moléculas de un cristal, una para cada cristal, produce su propio patrón de difracción, esto es, una serie de puntos distribuidos sobre la placa que delatan información sobre la colocación de las unidades difractoras y, por ende, de una estructura molecular..

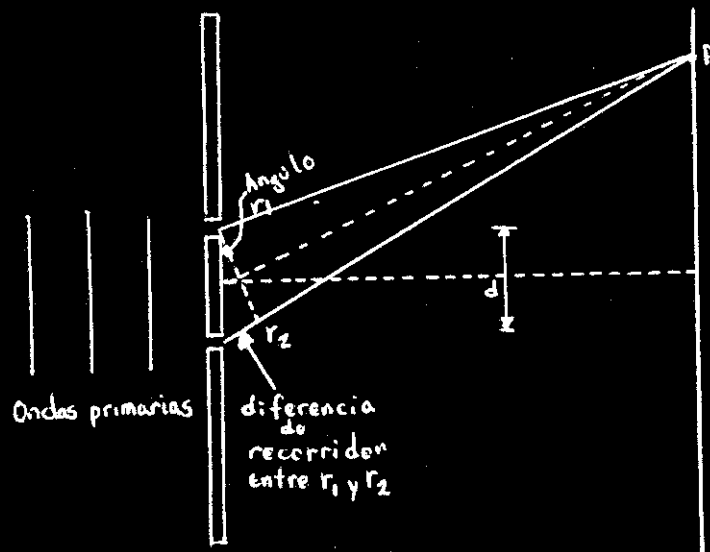
De acuerdo a los Bragg, los átomos o moléculas de las sustancias cristalinas son centros difractores, esto es, centros donde al incidir ondas primarias se producen ondas secundarias de forma esférica o, para simplificar, circulares (y que en el caso de Fresnel, son rendijas). Cada línea trazada del centro de difracción a cualquier punto de la onda circular representa un rayo de luz con dirección definida. Dicho rayo al incidir sobre una placa fotográfica produce un punto. En el planteamiento de Williams Bragg, los átomos o moléculas que constituyen a un cristal se encuentran distribuidos regularmente, lo que significa que la estructura molecular del cristal forma algo así como un tejido. Cada hilo representa, en esta metáfora de Bragg, una serie de átomos o moléculas que se repiten en una distribución lineal. Cada punto de esta línea representa una unidad

que difracta los rayos X. Cada una de estas unidades produce una onda secundaria que, al interactuar con las demás, da lugar a una serie de rayos combinados que incidirán sobre la placa fotográfica. En la representación de Williams Bragg (Cfr. *Ibidem*, pág. 141), las diversas capas que constituyen a la sustancia cristalina son líneas sobrepuestas una sobre la otra a intervalos (d) de separación (que corresponde en los estudios de Fresnel a la distancia entre rendijas).

En los estudios de difracción de Fresnel, la combinación de rayos que inciden sobre cualquier punto P dan lugar a máximos o mínimos de difracción, esto es, rayos en fase o fuera de fase. Dos rayos de igual longitud de onda están en fase cuando sus crestas y valles coinciden. Y está fuera de fase cuando la cresta de una coincide con el valle de la otra. Cuantitativamente dos rayos están en fase cuando la diferencia de sus recorridos es igual a un múltiplo entero de la longitud de onda. Y, por el contrario, está fuera de fase cuando la diferencia de sus recorridos es igual a media longitud de onda o cualquier fracción de longitud de onda. La diferencia de recorrido de dos rayos se define como el producto de la distancia que separa a los dos rayos (la cual es perpendicular a la dirección de la onda primaria) y el ángulo del segundo rayo respecto a la dirección de la onda primaria, como se indica en la ilustración de la siguiente página.

Supóngase el caso de dos rayos que se encuentran en fase incidiendo sobre el punto P1, cada uno de los cuales proviene del centro de rendija diferentes, separadas una de la otra por la distancia (d). Ahora supóngase que una de las rendijas permanece fija mientras la otra se desplaza, incrementando la distancia d , de tal modo que los mismos rayos incidiendo sobre el mismo punto P1 queden fuera de fase. En cada caso, la misma placa

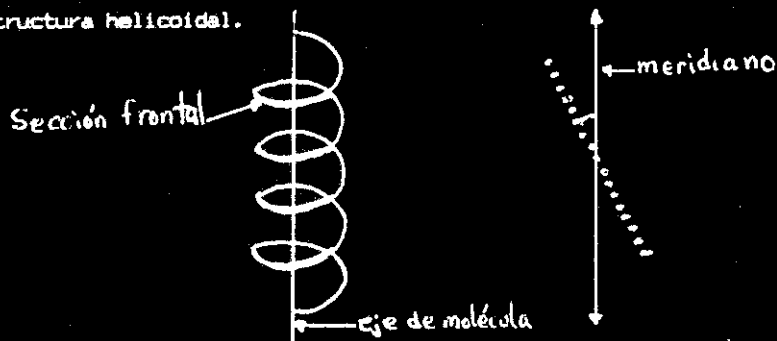
fotográfica registrará patrones diferentes en el mismo punto P_1 , que corresponden a disposiciones diferentes de los centros difractores, esto es, a estructuras diferentes. Cada punto sobre la placa fotográfica delata información sobre la estructura que deja su firma en ella. El mérito de los Bragg fue impulsar la cristalografía y atraer la atención sobre sus patrones de difracción, como fuente de datos en el reconocimiento de las estructuras moleculares cristalinas que los producen.



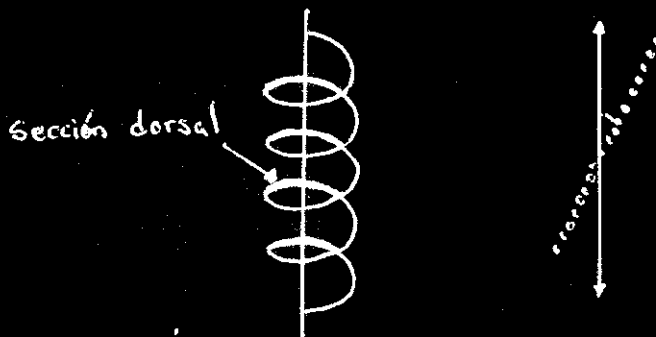
Uno de los factores que facilitaría el camino de la cristalografía hacia el reconocimiento de la estructura helicoidal del ADN fue el hecho de que Linus Pauling, a finales de la década de los cuarenta, pusiera de relieve la naturaleza helicoidal de las proteínas mediante sus modelos de hélice alfa y hélice gamma. Este hecho, que ganó el reconocimiento de la

biología molecular y que, en cierto modo, puso de moda en ella a las estructuras helicoidales, motivó a la cristalografía a desarrollar una teoría que permitiese reconocer más prontamente, dentro de los patrones de difracción, a las estructuras helicoidales. En 1952, Francis Crick y Cochran, y antes e independientemente de ellos A.R. Stokes, desarrollarían dicha teoría.

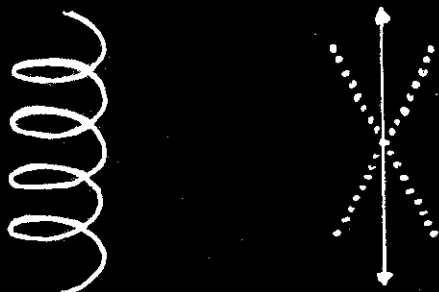
De acuerdo a esta teoría, una estructura helicoidal produce un patrón de difracción con las siguientes características: 1) Una serie de puntos dispuestos linealmente y de manera oblicua respecto al meridiano (el cual representa al eje de la molécula). Cada uno de estos puntos es determinado por una sección frontal de la cadena o cadenas que constituyen a la estructura helicoidal.



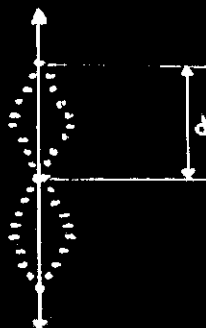
2) Otra serie de puntos dispuestos linealmente que cruzan a la anterior serie de puntos, con un ángulo de inclinación respecto al meridiano igual al de la primera línea. Cada uno de los puntos de esta línea es determinado por una sección dorsal de la cadena o cadenas.



De este modo, las secciones frontales y dorsales de la hélice producen, en conjunto, un patrón de difracción con serie de puntos dispuestos en forma de X.



3) Conforme los puntos ascienden o descienden del punto central (llamado ecuador del diagrama) se alejan del meridiano hasta una distancia límite, a partir de la cual los puntos se vuelven a acercar al meridiano. Si se traza una línea paralela al meridiano que vaya del punto más distante del meridiano a la altura del ecuador, la magnitud de esta línea representa la distancia que hay entre las unidades o eslabones que constituyen a la cadena helicoidal.



Gracias a esta teoría de difracción helicoidal se hizo posible no sólo reconocer la huella de una estructura helicoidal en los patrones de difracción de rayos X, sino además ubicar con relativa facilidad algunos

rasgos específicos de las hélices que los producían, relevantes para determinar sus estructuras moleculares.

Tanto la difracción helicoidal como la estereoquímica -la cual analizaremos en la siguiente sección- fueron herramientas que ofrecieron, respectivamente, la física y la química a la biología molecular en el establecimiento de la estructura del ADN, herramientas que no habrían de afectar a sus ciencias de origen al ser usadas en un trabajo revolucionario como el de Watson y Crick. De modo que, como veremos en la primera sección del siguiente capítulo, el modelo de la doble hélice para la estructura del ADN daría pie a una revolución que afectaría sólo a la biología molecular, es decir, a una microrevolución científica.

ESTEREOQUIMICA Y LA BUSQUEDA DE LA ESTRUCTURA DEL ADN

Junto al método empírico de interpretar los patrones de difracción de rayos X para determinar la estructura molecular de las sustancias expuestas a este tipo de radiación, el dúo de Cambridge decidirá seguir el camino trazado por Linus Pauling en la determinación de la estructura de la hélice alfa de las proteínas. Con las piezas del rompecabezas en mano -esto es, conociendo las seis submoléculas que constituyen a la macromolécula del ADN: el grupo fosforílico, el azúcar desoxirribosa, la adenina, guanina, citosina y timina, y conociendo leyes generales y específicas de enlaces químicos-, Watson y Crick tomarían la resolución de deducir la estructura del ADN principalmente de principios estereoquímicos, sin hacer a un lado por completo los datos cristalográficos. Sin embargo, hasta cierto grado esta resolución es comprensible dada la carencia de conocimientos y pericia que Watson tenía en esta materia para ese entonces. La falta de preparación en cristalografía no iba a ser un obstáculo para que James Watson formara equipo con Francis Crick en la búsqueda de la estructura del ADN. Además, dada la relativa sencillez de los principios cristalográficos, esta era una cuestión que podría salvarse con el tiempo. Pero a decir verdad, lo que al parecer influyó más determinadamente en la decisión que tomarían Watson y Crick es que para 1951, año en el que se conocen y deciden afrontar el problema de la estructura del ADN, no se conocía una buena radiografía del ADN.

"El propósito de la estereoquímica es establecer la estructura en tres dimensiones de las moléculas que se abordan" (Morrison y Boyd, Química

orgánica, ed. Fondo educativo interamericano, México 1985, pág. 123). De este modo, cuando se habla de principios estereoquímicos se habla de una serie de postulados que tienen que ver con las distancias, ángulos y fuerza de enlace entre los átomos de las moléculas o, en el caso de las macromoléculas, de las submoléculas. Las distancias y ángulos de enlace, que están determinados por el tipo de fuerzas que enlazan a los átomos o submoléculas, son las instancias topológicas o geométricas que configuran o dan forma a la estructura molecular en el espacio. El objetivo de plantear postulados estereoquímicos es la de restringir las posibles estructuras que pueda tener la sustancia investigada en base a las distancias y ángulos de enlace que se establecen o conocen para sus componentes. Por ejemplo, en su primer intento por hallar la estructura del ADN, Watson y Crick introdujeron el siguiente postulado para confinar la estructura del ADN a la categoría de las estructuras helicoidales: "Que todos los residuos son equivalentes. Como Pauling ha señalado, esto conduce necesariamente a estructuras helicoidales. No nos sentimos absolutamente vinculados por este postulado, que puede relajarse de dos maneras: a) mientras ciertas partes de cada residuo puede que sean equivalentes, otras quizá no lo sean. Esto es literalmente obvio porque los anillos básicos son diferentes en residuos diferentes. b) Los residuos pueden entrar dentro de un número reducido de grupos, dentro de los cuales todos los residuos son equivalentes" (Robert Olby, El camino hacia la doble hélice, pág. 505). En este postulado se reconoce las configuraciones diferentes, en cuanto a distancias y ángulos, que pueden tener los anillo de los residuos. Por ejemplo, mientras el azúcar desoxiribosa tiene un anillo pentagonal o cinco enlaces que forman un pentágono -y, por tanto, con cinco distancias y cinco ángulos de enlace específicos-, la timina forma un anillo

hexagonal, con seis átomos diferentes, uniéndose por pares a determinadas distancias.

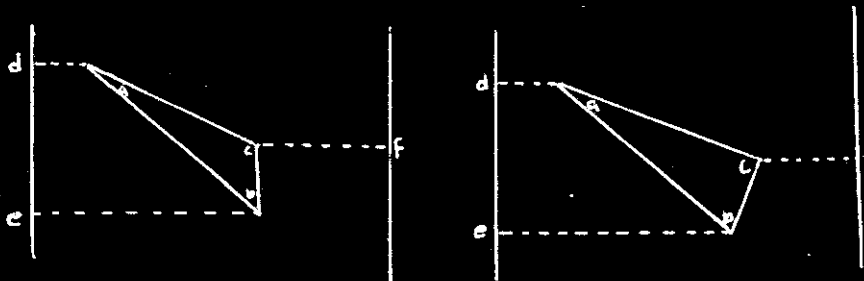
Pero por más precisos que fueran los postulados estereoquímicos, de ninguna manera se pretendía con ellos sustituir el valor científico de los datos cristalográficos; pues a fin de cuentas la instancia que dictaminaba si los modelos construidos a partir de postulados estereoquímicos podían corresponder o no a la realidad eran los datos cristalográficos. En términos generales, el método utilizado por Linus Pauling para hallar la estructura proteínica y retomado por Watson y Crick para descifrar la estructura del ADN consiste en construir modelos de moléculas a partir de principios estereoquímicos y el mínimo de información cristalográfica, modelos que finalmente habrían de ser sometidos a la prueba de la comprobación empírica, esto es, si toda la información delatada por las mejores fotografías de rayos X respaldaban o no los aspectos sugeridos en el modelo construido.

El partir o basar la búsqueda de la estructura molecular en postulados estereoquímicos de ningún modo rompe, por más ingenuo e infantil que pareciera, con el riguroso proceder del análisis cristalográfico. De hecho, el que Watson y Crick -lo mismo que Pauling- consideraran que podría construirse un modelo de la estructura molecular del ADN a partir de principios estereoquímicos para después confrontarlo con los patrones de difracción correspondientes, deja en claro de que eran conscientes de que seguían un camino que era consistente con los procedimientos cristalográficos. Si bien construir modelos a partir de la estereoquímica, comparado con la laboriosa construcción de modelos a través de la interpretación de los patrones de difracción, parecía un juego de niños que tan sólo requería -como en el caso de Pauling al afrontar el problema de la estructura de la queratina alfa-, "papel, lápiz y una regla" (Olby, Op. cit.

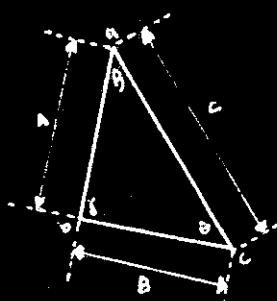
pág. 403); ello no significa que, en el fondo, postular principios estereoquímicos haya sido una labor sencilla. Detrás de la formulación de postulados estereoquímicos hay una serie de razonamientos que tienen que ver con los enlaces que configuran o dan forma a la estructura tridimensional de las moléculas. El problema estereoquímico al que se enfrentaban Watson y Crick era el de hallar los puntos de enlace entre las submoléculas que constituyen al ADN que dieran lugar a una configuración tridimensional que fuera consistente con los mejores patrones de difracción del ADN. El problema, en el fondo, era lograr un modelo de estructura del ADN en el que se respetasen las distancias y ángulos de enlace entre los elementos que constituyen a las diferentes submoléculas del ADN; evitando con ello se violaran conocimientos químicos ya establecidos y, por ende, una estructura que no fuera químicamente viable -es decir, un modelo en que las piezas que representan a las diferentes submoléculas del ADN acoplaran entre sí de una manera justa, sin que hubiera entre ellas huecos o encimamientos que violentaran distancias y ángulos de enlace intramoleculares e intermoleculares ya establecidos por estudios anteriores. En las siguientes palabras de Watson y Crick queda claramente ejemplificado la naturaleza de los problemas estereoquímicos que enfrentaron en la construcción del modelo de la estructura del ADN: "Sin embargo, cuando intentamos el paso siguiente, unir los grupos fosfato con los grupos azúcar, empezaron las dificultades. Los grupos fosfato tendían a estar demasiado alejados de los azúcares como para alcanzarse entre sí, o a estar tan juntos que los azúcares sólo encajarían violando crasamente los contactos de Van der Waals".....(Vid Ibidem, pág. 563).

El proceder basado en postulados estereoquímicos adoptado por Watson y Crick en la construcción del modelo de la estructura del ADN podría

de las cuales, supóngase, tiene en efecto un anillo triangular cuyas distancias y ángulos de enlace intramolecular coinciden con algunas de las distancias y ángulos de enlace para los átomos involucrados:

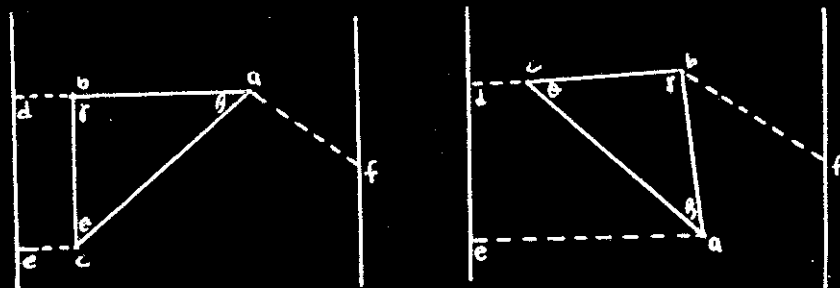


Supóngase, finalmente, que los estudios estereoquímicos más recientes sobre nuestra sustancia ficticia establecen que el anillo triangular que la constituyen tiene las distancias A, B y C, para los enlaces ab, bc y ca respectivamente, y los ángulos beta, gama y teta, conforme se establece en la ilustración.

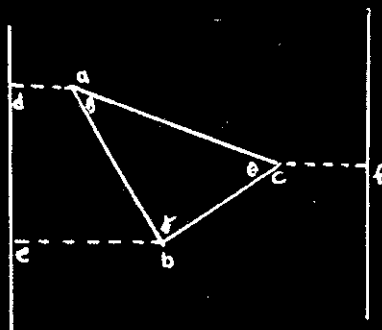


Una vez que se adopta este dato como un postulado estereoquímico más que nos guíe en la búsqueda de una solución, lo que tenemos que hacer es colocar el modelo de la molécula triangular junto a las demás piezas que representan a las cadenas, previamente dispuestas conforme a los postulados que se refieren a ellas, haciéndolo girar hasta que se obtenga una disposición que satisfaga dos importantes postulados que se refieren a los enlaces de la

molécula triangular a las cadenas: 1) todos sus enlaces son perpendiculares a las cadenas, 2) el enlace dx , donde x es cualquiera de los átomos que constituyen el anillo triangular, tiene una distancia k . En virtud de este primer postulado se eliminan, por ejemplo, las siguientes dos estructuras:

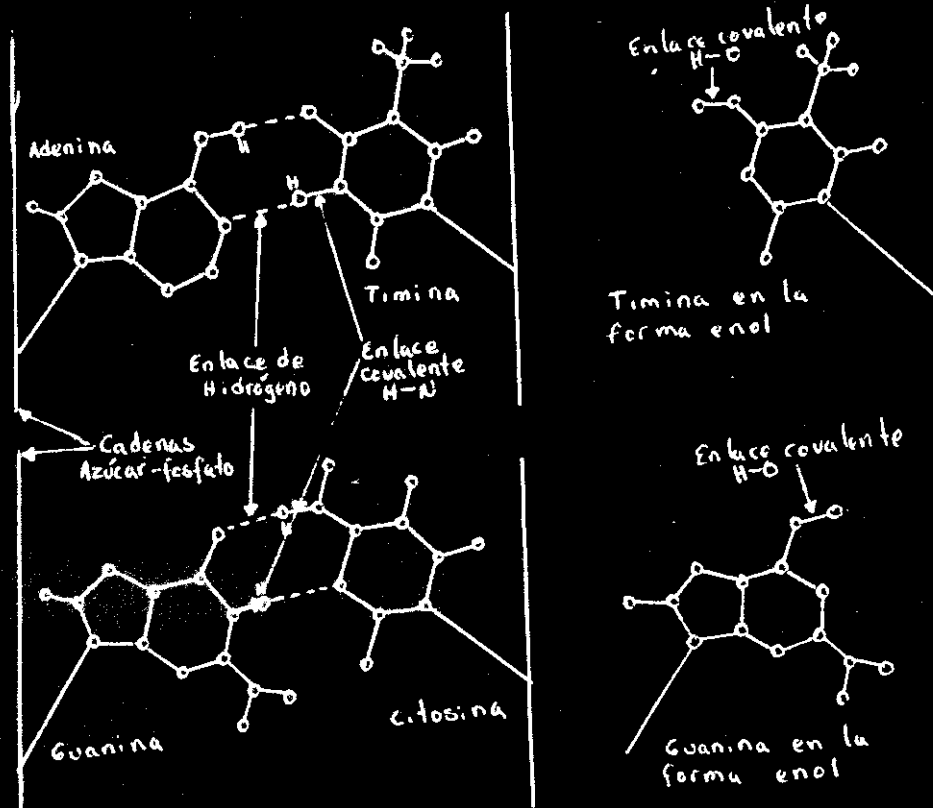


En fin, en base a estos dos postulados se eliminan una serie de configuraciones, quedándonos sólo la siguiente:



Esta manera de abordar el problema de la estructura del ADN fue tan decisivo en el trabajo de Watson y Crick que el desconocimiento de la posición correcta de un átomo de hidrógeno dentro de las moléculas de la guanina y la timina —posición que es fundamental para los enlaces de hidrógeno entre los pares de bases sugeridos por las proporciones de Chargaff— retrasaría la solución de dicho problema. El conocimiento de las formas tautoméricas de la guanina y la timina que se presentan en el ADN, en

el momento crucial del trabajo de Watson y Crick, se convertiría en la clave que permitiría descifrar la incógnita de la estructura del ADN; pues la posición del átomo de hidrógeno en las formas keto de la guanina y la timina, a diferencias de las formas enol, permitiría enlazar, sin mayores dificultades, la timina con la adenina, y la guanina con la citosina. Para finalizar la presente sección, y a fin de que se pueda apreciar cuán tan importante era para el procedimiento seguido por Watson y Crick el conocimiento de las distancias y ángulos de enlace intramoleculares e intermoleculares de las submoléculas del ADN, dibujamos junto a los enlaces que tendrán las bases en el modelo de la doble hélice, a las formas enol de la guanina y la timina.



EL MODELO DE PAULING Y SU IMPACTO EN WATSON Y CRICK

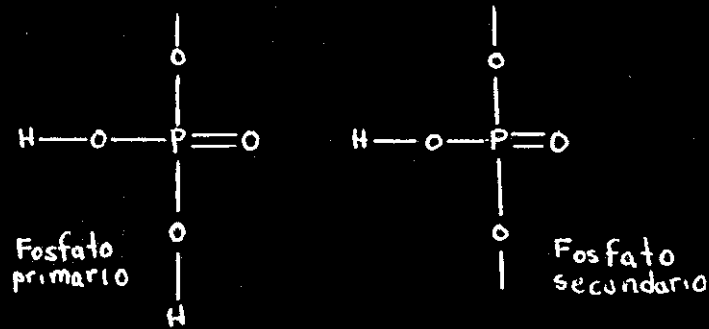
Después del fracaso que tuvieron Watson y Crick en 1951, en el que su modelo de la triple hélice para la estructura del ADN fuera duramente criticado y rechazado por Rosalind Franklin y, a partir de ahí, se les prohibiera continuar su trabajo en relación a la estructura del ADN, sólo una circunstancia muy especial motivaría y permitiría a este par de científicos resudar esta labor. La posibilidad de que Linus Pauling, un norteamericano, arrebatara de las manos de un laboratorio inglés un importante descubrimiento, como en el caso de la hélice alfa para la queratina, obligaría a Bragg -quien era encargado de los laboratorios de Cambrige- hacer a un "lado una decisión que limitaba a Watson y Crick a trabajar sobre la estructura del ADN" (Vid, Watson op. cit. págs. 191-192), "decisión que tomara por el desacato de este par de científicos al invertir tiempo en una investigación que no les correspondía y que, por su fracaso -esto es, por el modelo equivocado que esta concibió para el ADN- desacreditaba a su laboratorio" (Ibidem, págs 115-120). Al retirar Bragg las restricciones a Watson y Crick, les permitía continuar una labor que estaba originalmente encomendada para el laboratorio del Kings, al frente del cual trabajaba Maurice Wilkins, un íntimo amigo de Francis Crick. Ante la posibilidad de que Pauling reconociera un grave error cometido en su modelo de la estructura del ADN y, al enmendarlo, lograra descubrir la estructura real de esta sustancia, Watson y Crick lograrían superar la frustración del fracaso, resurgiendo con

mayor vigor sus deseos de descubrir la estructura del ADN. El tomar conocimiento del modelo de Pauling para la estructura del ADN y del error que éste llevaba consigo, alentaría a Watson y Crick a retomar su trabajo de 1951 y buscar apoyo a su propósito de hallar la estructura del ADN. El modelo de Pauling, aunque era incorrecto, jugó su papel en el descubrimiento de la estructura del ADN, esto es, impregnó al interés de Watson y Crick por hallar la estructura del ADN de una clara actitud de competencia.

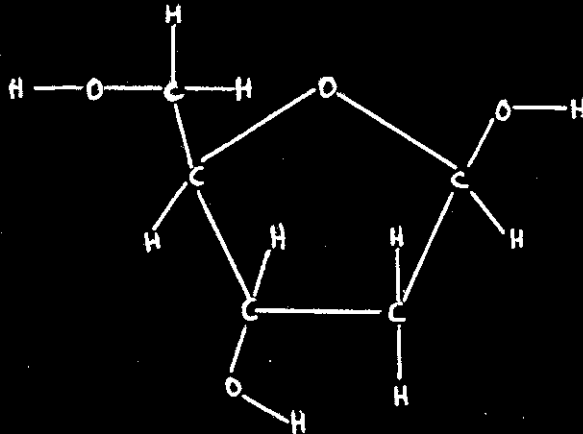
Al igual que el modelo construido en 1951 por Watson y Crick, el modelo de Pauling constaba de tres cadenas helicoidales de fosforo-azúcar colocadas al interior de la molécula, con las bases adenina, guanina, citosina y timina dispuestas en el exterior. Aunque esta disposición de las cadenas fosforo-azúcar y de las bases contradecía el hecho de que el ADN mostrara una propensión al agua, no era esta el punto que destacara como error a los ojos de Watson, quién fuera el primero en detectar la grave equivocación cometida por Pauling en su modelo.

Pero veamos con mayor detalle el error que volviera la esperanza de hallar la estructura a Watson y Crick:

Además de las cuatro bases, otras dos submoléculas o piezas más que forman parte de la estructura molecular del ADN son, por un lado, los grupos fosfáticos y, por otro, el azúcar desoxirribosa. Los grupos fosfáticos son aquellos que se derivan del ácido fosfórico, por la pérdida de uno, dos o tres de sus hidrógenos. Cuando el ácido fosfórico pierde uno de sus hidrógenos, el fosfato derivado es del grupo primario. O si pierde dos o tres es, respectivamente, del grupo secundario o terciario:



La desoxirribosa, a diferencia de la glucosa, la fructosa y la galactosa, es un azúcar con cinco carbonos, cuatro de los cuales forman un anillo pentagonal con un oxígeno, como se muestra en su fórmula estructural:



Desde 1929 se sabía, por estudios de Levene, que la unidad fundamental del ADN era el nucleótido, el cual se compone, en el orden siguiente, de un grupo fosfático, el azúcar desoxirribosa y una base. El aspecto común en los cuatro nucleótidos (que tan sólo se diferencian por la base que forma parte de él) es el grupo fosfático y el azúcar desoxirribosa, los cuales constituyen las cadenas helicoidales del ADN. Por "estudios del propio Levene

se sabía también que estos dos eslabones, dada la naturaleza de los nucleótidos, se van sucediendo alternadamente uno a uno a través de la cadena" (Ibidem, pág. 149). Por esta razón, cada azúcar desoxirribosa, excepto los de principio de cadena, se une en sus extremos a dos grupos fosfáticos. Y por la misma razón, cada grupo fosfático se une en cada uno de dos extremos con moléculas de desoxirribosa. De este modo, "dos de los tres grupos -OH del ácido fosfórico, en los ácidos nucleicos, se enlazan, mediante esterificación, con los grupos -OH del azúcar pentosa" (Morrison y Boyd, Op. cit., pág. 137). Es decir, desde 1929, se daba por hecho que dichos grupos -OH del ácido fosfórico formaban parte de la estructura regular del ADN, cualquiera que ésta sea.

Un hecho más que era del dominio de los químicos en 1952, año en el que Pauling construye su modelo de la triple hélice para el ADN, "es que el carácter ácido de los ácidos nucleicos se debe a la ionización del tercer grupo -OH del ácido fosfático" (Idem). Es precisamente en este punto donde el modelo de Pauling falla y por el cual Watson hace la siguiente señalamiento: "Entonces, me di cuenta de que los grupos fosfato del modelo de Linus no estaban ionizados, sino que cada grupo contenía un átomo de hidrógeno enlazado, y, por ello, no tenía carga definida. En cierto sentido, el ácido nucleico de Pauling no era ningún ácido" (Watson, La doble hélice, pág. 179). Y es que en el modelo de Pauling la desionización del grupo -OH restante es fundamental en el enlace de las cadenas, en virtud de que éstas se enlazan mediante puentes de hidrógeno: "En la estructura de Pauling cada grupo primario conservaba su ion de hidrógeno, y éste podía formar un puente de hidrógeno sobre el grupo P=O de una cadena vecina" (Olby, El camino hacia la doble hélice, pág. 555). El punto es que Pauling conservaba, en su modelo, el hidrógeno del grupo primario, como puente de enlace entre las cadenas;

contradiciendo, con ello, el hecho de que los ácidos nucleicos (ADN y ARN) pierden el hidrógeno del grupo primario en la donación del protón de éste, quedando el oxígeno contiguo cargado negativamente al quedarse con el electrón que acompañaba al protón donado.

Es este punto, que no está directamente relacionado con los datos cristalográficos y con el proceder dictado por la estereoquímica, el que el intrépido dúo de Cambridge y el resto de su comunidad científica no dejarían pasar por alto en el modelo de Linus Pauling.

EL GRUPO FAGO

Tanto la identificación del material genético como el descubrimiento de la estructura del ADN, como acontecimientos científicos, son producto de la actividad científica del grupo fago. De acuerdo a Watson, "este grupo se constituye entre los años de 1940 y 1950 con el propósito de averiguar qué es y cómo se multiplica un gene a partir del estudio de las características o propiedades de los virus, entre los que se encuentran los bacteriófagos como los más simples de estructura y, por ende, viables de estudiar" (Watson Op. cit., pág. 37). En esta delimitación que hace Watson del grupo fago, hay un elemento que, a diferencia del propio Watson, excluiría a Francis Crick de este grupo, a saber, el haber trabajado con bacteriófagos en el problema de la identificación de la sustancia genética. Este mismo elemento excluiría a la actividad encaminada a establecer la estructura del ADN como parte del trabajo del grupo fago. Sin embargo aun cuando el trabajo encaminado a determinar la estructura del ADN no tiene que ver directamente con bacteriófagos, es un trabajo que se circunscribe dentro de las labores científicas del grupo fago. No sólo porque, sin duda alguna, James Watson era un miembro de este grupo, sino porque se trataba de una labor que encuadra dentro del desarrollo ulterior de sus actividades, esto es, en una etapa en la que, ante el fracaso de determinar la identidad del material genético vía bacteriófagos, este mismo grupo habría de adoptar una vía diferente, una vía que no dejara duda de que la sustancia que se indicaba como material genético fuera en efecto tal.

Para Robert Olby, la labor científica del grupo fago atraviesa por dos periodos de evolución. El primero sería el periodo de constitución, el cual, como lo indica Watson, está comprendido del año 1940 al año 1950. En este periodo, "el enfoque que adopta el grupo fago en su afán de resolver el problema de qué es el gene es un enfoque físico-genético" (Olby, El camino hacia la doble hélice, pág. 345), que consiste fundamentalmente en "ir directo al problema de la replicación y la acción de gene" (Olby, op. cit., pág. 345). En vista que se consideraban a los virus como ejemplo de genes (por la simple razón de que los virus, al igual que los cromosomas, son sustancias nucleoproteínicas) y a los bacteriófagos como los más simples virus, y dado que era posible estudiar la replicación y acción de los bacteriófagos, se volvieron, en este periodo del trabajo del grupo fago, en el medio más idóneo de indagar la identidad del material genético. En este periodo, el problema de saber qué es el gene es el problema de saber cuál de las dos sustancias nucleoproteínicas presentaba la replicación y acción del gene. De este modo, el problema de qué es el gene es el problema de establecer si es proteína, ADN o ambas sustancias conjuntamente.

Sin embargo, ante la ambigüedad que mostraban los resultados de los experimentos realizados en este sentido, esto es, ante la dificultad de no poder precisar cuál de las dos sustancias nucleoproteínicas tiene la función primaria o fundamental en la reproducción genética, en vista de que las dos parecían igualmente importantes, en 1950 se inicia un segundo periodo en el trabajo del grupo fago; el cual se caracteriza por asumir un "enfoque químico-genético en la búsqueda de la identidad de la sustancia genética" (Ibidem, pág. 349). Watson se refiere al factor decisivo que condujo al grupo fago a abrazar el enfoque químico-genético (como un enfoque alterno al enfoque físico-genético) en los siguientes términos: "Mientras Dalbruck

confiaba que los expedientes puramente genéticos podían resolver el problema, Luria se preguntaba a menudo si la solución real llegaría sólo después de haber sido develada la estructura química de un virus, es decir, un gen" (Watson, La doble hélice, pág. 37). Es precisamente por motivación de esta pregunta que Salvador Luria enviaría a James Watson a estudiar química-genética a Copenhague. A diferencia del enfoque físico, el enfoque químico basa su objetivo de determinar la identidad de la sustancia genética en el estudio de aspectos estructurales de las sustancias nucleoproteínicas, dentro de ellos, las propias estructuras moleculares de éstas. Para este enfoque, el gen (o la sustancia genética) es aquella sustancia que muestre una estructura molecular que sea compatible o explique la función genética que caracteriza al gen.

La búsqueda de la estructura del ADN, sin duda alguna, era uno de los objetivos que estaba presente en el trabajo del grupo fago a partir del año de 1950, como medio para determinar la identidad de la sustancia genética (que era su objetivo central). Sin embargo, dado que durante los siguientes dos años se acumularían pruebas más convincentes que mostraban al ADN como sustancia genética (como los resultados del experimento de Hershey y Chase), el establecer la estructura molecular de éste se volvería en la prueba decisiva para confirmar o refutar lo que los experimentos de Avery sugerían desde 1944.

El grupo fago, cuyos miembros en su mayoría fueron físicos o químicos, influenciados a incursionar en la biología por el libro de Erwing Schrodinger *What is life?*, sería el encargado de impulsar un cambio en la ciencia de la biología, específicamente en la genética, que habría de apoyarse en la teoría de la doble hélice de Watson y Crick como su más firme soporte. Sus miembros fueron los encargados de desachar el modelo de la triple hélice de Pauling

como estructura del ADN y aceptar el modelo de la doble hélice de Watson y Crick como la estructura que no sólo estaba de conformidad con todos los datos cristalográficos, estereoquímicos o químicos del ADN disponibles hasta ese momento, sino con todos los demás datos que mostraban al ácido desoxirribonucleico como la sustancia genética.

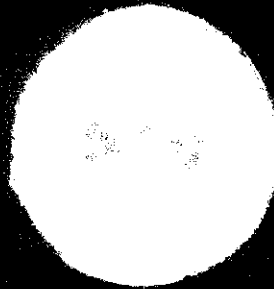
LAS SEIS SEMANAS EN LAS QUE SE DETERMINO LA ESTRUCTURA DEL ADN

Después de casi quince meses de haber hecho a un lado el trabajo encaminado a determinar la estructura del ADN, en 1953 Watson y Crick decidirían retomarlo, esta vez con la firme decisión de llegar a una solución. Lo que llama la atención entorno a esta segunda etapa del trabajo de Watson y Crick es la prontitud con la que lograrían, en esta ocasión, su propósito. Aunque los datos y conocimientos relacionados con la estructura del ADN hace tiempo se habían estado gestando, el trabajo de Watson y Crick, en esta segunda etapa, tan sólo invertiría seis semanas para lograr su fruto anhelado:

Entre el 28 y 29 de enero de 1953 este par de científicos se enteraría de los detalles del modelo de la triple hélice de Pauling, por la lectura de una copia del informe que escribiera Pauling a propósito de este modelo y que enviara a su hijo Peter, el cual se encontraba por aquellos tiempos realizando estudios de doctorado en la Universidad de Cambridge. Por lectura de este informe, Watson y Crick se percatarían de los errores cometidos por Pauling al desionizar los grupos fosfóricos de su modelo, error que les hacía recobrar la esperanza de ser ellos los que descubrieran la estructura del ADN.

Ante el eminente hecho de que el modelo de Pauling se debatiera y éste intentara mejorarlo al percatarse de los errores en él cometido, la reacción de Watson y Crick fue la de reanudar el trabajo que había quedado truncado en noviembre de 1951. Ante la premura del tiempo, el viernes treinta de enero de

1953, Watson visita el King's, a fin de solicitar comentarios del modelo de la triple hélice de Pauling. En dicha visita, la cristalógrafa del King's, Rosalind Franklin desaprobaba la actitud de Linus, y de cualquier otro que como él quieren ver en el ADN una estructura helicoidal. Sin embargo, más allá de los comentarios negativos que recibiera de Franklin, la visita al King's sería realmente provechosa para el trabajo del dúo del Cambridge. Y es que en dicha visita Maurice Wilkins revelaría a Watson una fotografía cristalográfica de mejor calidad del ADN, lograda por Franklin en mayo de 1952. Dicha fotografía, en la que se ofrecen importantes datos para la resolución del problema de la estructura del ADN y a la que se conoce como patrón de forma B, es:



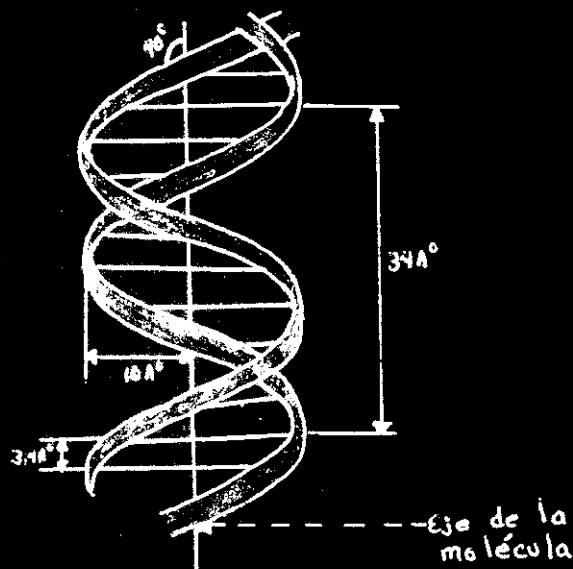
Los datos más relevantes que ofrecía esta fotografía a Watson y Crick son:

- a) Un intenso punto ecuatorial que corresponde al diámetro del cilindro que parece adoptar la estructura helicoidal, cuya dimensión es de 20 Angstroms.

b) Una intensa reflexión meridional de 3.4 Anstrongs que venía a confirmar la idea de Astbury de que esta reflexión representa la distancia entre bases vecinas.

c) Una periodicidad axial de 34 Anstrongs que representa la distancia que hay entre cada paso de la hélice, es decir, cada vuelta completa que se da a través de la cadena helicoidal.

d) Un sesgo de hélice de unos 40 grados respecto al meridiano, el cual representa la pendiente con la que asciende o desciende la cadena, tomando como referencia el eje de la molécula helicoidal.



Además de los datos que revelaba esta fotografía, Wilkins daba a conocer a Watson un importante dato que tenía que ver indirectamente con esta fotografía, gracias al cual podía determinarse el número de cadenas que constituyen la molécula del ADN: el incremento de la longitud de la fibra del ADN en un 20 % al pasar de un 42 por ciento de humedad (que es la humedad relativa a la que se obtiene la forma A, que era un patrón que ofrecía menos detalles de la naturaleza helicoidal de la molécula del ADN) a un 75 por

ciento de humedad (que es la humedad relativa a la que se obtuvo la fotografía que mostraba Wilkins a Watson). Sin duda, lo que atrajo la atención de Watson de este dato es que presentaba una relación directamente proporcional con la periodicidad axial, esto es, que la longitud de la fibra aumentaba en la misma proporción que aumentaba la periodicidad axial. En la forma A la periodicidad es de 28 amstrongs; en tanto que en la forma B es de 34. Entre la dos formas hay una diferencia de 6 amstrongs, que es casi el 20 % de 34. Si en la forma B la separación de los residuos es de 3.4 angstrongs en dirección al eje de la fibra; la separación entre los residuos de la forma A, al buen entender de Watson, habría de ser el 80 % de 3.4, esto es, $(3.4)(0.8) = 2.72$. Con este valor, junto con el valor de la periodicidad axial de la forma A, Watson calculaba "el número de residuos en la repetición de una sola cadena de la forma A en 10 ($28/2.72 = 10$)" (Vid Olby, Op. cit. pág. 560). Por un trabajo de Rosalín Franklin, Watson sabía que el número de nucleótidos de la celdilla unitaria (que es la unidad de difracción del ADN) de la forma A es de 46. De acuerdo a Watson, "si una cadena de la forma A tiene 10 residuos o nucleótidos, una molécula de tres cadenas tendría 30, 60 ó 90 nucleótidos por celdilla unitaria. Pero si era de dos cadenas, entonces su celdilla unitaria tendría 20, 40 u 80 nucleótidos. "En virtud de que, por el trabajo de Franklin, sabía que la celdilla unitaria de la forma tiene 46, Watson se decidió por una doble hélice, pues 40 está más cerca de 46 que 30" (Ibidem, págs. 559 y 560).

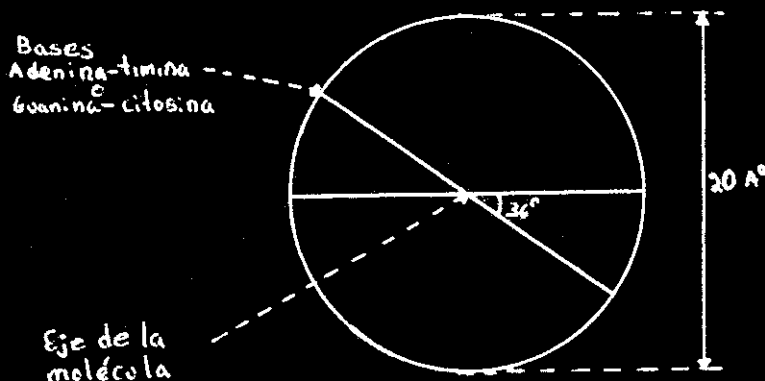
Si bien todos estos datos no eran suficientes para construir el modelo de la estructura del ADN que finalmente se aceptaría como estructura de esta sustancia; Watson y Crick contaban, desde los primeros días de reanudar su trabajo a este respecto, con una significativa cantidad de datos que les permitiría construir modelos de dos cadenas. Al principio, durante dos días,

intentarón construir modelos con dos cadenas interiores. Sin embargo, ante el constante fracaso al que se enfrentaban al colocar las cadenas en el interior, Watson, que era el encargado de construir los modelos, decidiría tomar en cuenta la crítica que hiciera Rosalind Franklin en 1951 a su modelo de triple hélice, en la que se sugiere que las cadenas fosfato-azúcar se encuentran en la parte exterior de la molécula. Durante los siguientes días, después del primero o dos de febrero de 1953, Watson optaría por construir modelos con dos cadenas externas.

Aunque con dicha decisión se encontraban, sin saberlo en ese momento, más cerca de la solución; al parecer esperarían recibir más información que les permitiera estar seguros de que contaban con las pistas correctas. De ahí, que, a fin de obtener cualquier otra información que les permitiera avanzar en la solución del problema que tenían entre manos, en el transcurso de la primera semana de febrero Crick invitara a Wilkins a pasar un fin de semana en su casa. Sin embargo, durante la visita que realizara Wilkins ese fin de semana, nada nuevo pudo revelar a Watson y Crick; lo único que hizo fue confinar los datos que una semana antes había confiado a Watson.

No es sino hasta la segunda semana de febrero cuando una novedad acerca del ADN llega a las manos de Crick. Por "el informe que enviara John Randall a todos los miembros del Biophysics Research Committee que acudieron a visitar su unidad el 15 de diciembre de 1952, en el cual se incluye un resumen del trabajo de Franklin" (Ibidem, págs. 565-566), Watson y Crick se enterarían de que la forma cristalina del ADN era C2 monoclinica. La importancia de este hecho radica en que implica la doble dirección de las cadenas, es decir, "que una corre hacia arriba y la otra hacia abajo" (Cfr. Ibidem, pág. 567). Pero más aún, durante el transcurso de esta semana, la comprensión de las consecuencias que implica este hecho permitiría a Crick concluir que los

nucleótidos se encuentran separados a 36 grados y no a 18 grados como pensara Watson. Esto es, que los nucleótidos, vista la molécula desde su parte superior o inferior, se encuentran, cada uno respecto al anterior inmediato, a 3.4 anstroms por debajo y a 36 grados de giro, como se indica en la siguiente ilustración:



De este modo, al comenzar la tercera semana de febrero, Watson y Crick, además de contar con los datos que presentaba la fotografía de 1952 de Franklin, contaban con: "1) un modelo aceptable de esqueleto azúcar-fosfato para la molécula del ADN, 2) con la pista de que la molécula del ADN es una doble hélice, 3) con la sugerencia de Franklin de que la cadenas se encuentra en la parte exterior de la molécula y 4) con la postura de Crick a favor de cadenas antiparalelas y una separación entre residuos de 36 grados" (Ibidem, pág. 570).

Con todos estos elementos en mano, el problema que quedaba por delante era el de cómo acoplar las bases entre las cadenas, sin que éstas pierdan su regularidad. En la tercera semana de trabajo, Watson y Crick se enfrentaban a la dificultad de cómo acoplar las bases al interior de la molécula o, como señalara Watson, "disponer de algún modo las bases localizadas en el centro

para que los esqueletos del exterior fueran completamente regulares" (Watson, La doble hélice, págs. 182-183). Al afrontar este problema, Watson habría de tomar la decisión de incluir un punto que en la construcción de sus modelos anteriores había hecho a un lado, esto es, considerar la conexión de hidrógeno como una característica importante de la estructura del ADN. Sin embargo, dado que cada base pura examinada hasta entonces formaba enlaces irregulares de hidrógeno como era estereoquímicamente posible, "el quid de la cuestión era una regla que gobernara la conexión entre bases" (Watson, op. cit., pág. 183). Con la esperanza de hallar dicha regla, consultaría la tesis de June Broonhead. "Allí encontró un patrón regular de enlaces de hidrógeno entre bases vecinas de adenina y guanina, precisamente en el orden de distancia adecuado para el empaquetamiento dentro de su doble hélice" (Olby, El camino hacia la doble hélice, pág. 572). En la lectura que hiciera de esta tesis entre el 18 y 19 de febrero, Watson lograría identificar en el hidrocloruro de guanina pares de esta purina ligados por hidrógeno. Influenciado por este descubrimiento, acoplaría con éxito pares semejantes de moléculas de pirimidina empleando las formas tautoméricas que se reconocían como las más comunes. Para el 19 de febrero Watson contaba con una manera de conectar bases entre las cadenas fosfato-azúcar, en las que las bases se acoplan por afinidad, es decir, guanina con guanina, adenina con adenina, timina con timina, y citosina con citosina. En esta etapa, de acuerdo a la perspectiva de Watson, "cómo iba a poder mantener la regularidad del esqueleto y encajar dos pirimidinas encima de dos purinas" (Ibidem, pág. 573), esto es, encontrar los puntos de enlace de hidrógeno entre bases iguales que permitan que éstas encajen justamente entre las cadenas.

Sin embargo, dado que Watson consideró las formas tautoméricas incorrectas para la guanina, la citosina y la timina, la manera de acoplar

bases por afinidad inmediatamente recibiría la crítica. Al día siguiente de que Watson lograra acoplar bases iguales, el 20 de febrero, Jerry Donohue le haría saber que las formas tautoméricas de la guanina, citosina y timina "no existen en la forma enol, sino en la forma ceto" (Ibidem, pág. 577). Sin duda, este señalamiento trastocaba en el fondo el modelo de la estructura del ADN que había concebido un día antes. Parecía ser una idea tan buena como para abandonarla por un señalamiento como el de Donohue. Es por ello que Watson, durante una semana, se resistiría a abandonar la idea de que las bases se acoplaran por afinidad al interior del par de cadenas. Es hasta el 27 de febrero, día en que Donohue repitiera por segunda vez su crítica al modelo del 19 de febrero, que Watson abandonaría definitivamente este modelo. No sólo era el hecho de que Watson no usara las formas tautoméricas correctas lo que hacía defectuoso su modelo; además estaba el hecho de que dicho modelo no "explicaba la simetría C2 ni las proporciones entre las bases de Chargaff" (Ibidem, pág. 578). El siguiente modelo debería, por lo tanto, incluir estos dos aspectos como cualidades de la estructura.

Con estas dos exigencias para el siguiente modelo, al día siguiente, sábado 28 de febrero, Watson intentaría de nuevo acoplar bases, pero en esta ocasión tomando las formas tautoméricas correctas. Tras varios intentos de acomodar las bases, de "repente, comenta Watson, me di cuenta de que el par adenina-timina unido por dos enlaces de hidrógeno tenía una forma idéntica al par guanina-citosina, unido como mínimo por dos enlaces de hidrógeno. Todos los enlaces de hidrógeno parecían formarse naturalmente" (Watson, La doble hélice, págs. 195-196). Las bases acopladas de esta manera ajustaban entre las cadenas: "Dos secuencias irregulares de bases podían quedar regularmente empaquetadas en el centro de una hélice siempre que cada purina estuviera ligada por hidrógeno a una pirimidina" (Watson, op. cit., pág. 217). Pero lo

más curioso de acoplar de esta manera las bases es que, como apunta Watson, "las reglas de Chargaff de repente aparecían como consecuencia de la estructura helicoidal doble del ADN" (Ibidem, pág. 218). Ese 28 de febrero de 1953, Watson por fin vislumbraba la posibilidad de estar cerca de la solución al problema de la estructura del ADN. Sus ánimos fueron en aumento ese mismo 28 de febrero cuando, por un lado, Donohue no presentó objeción a su forma de enlazar las bases y cuando Crick, por otro, vio en esa forma de enlazar las bases la simetría C2.

Aunque en esencia el problema de la estructura del ADN había quedado resuelto el sábado 28 de febrero, aún no era tiempo de echar a vuelo las campanas de la victoria; por precaución habría que esperar la construcción del modelo a fin de verificar las coordenadas de todos sus elementos. En vista de que no contaban con las representaciones metálicas de las bases en las formas tautoméricas correctas, la construcción del modelo se iniciaría hasta el miércoles 4 de marzo. Después de cuatro días de trabajo, el sábado 7 de marzo quedaría construido el modelo. Con el modelo en mano, la semana del 9 al 14 de marzo se realizarían todos los cálculos o mediciones pertinentes a fin de corroborar la estereoquímica del modelo. Al verificar la estereoquímica de su modelo, Watson y Crick podían sentirse seguros de haber llegado a la meta antes que nadie, esto es, haber descubierto la estructura del ADN. Al corroborar la estereoquímica de su modelo el 14 de marzo de 1953 Watson y Crick tenían buenas bases para anunciar que habían hecho un descubrimiento importante. De modo que al día siguiente de que terminaran de comprobar la estereoquímica de su modelo, escribirían un trabajo a fin de informar de su hallazgo. Una copia de dicho informe debió llegar al King's dos días después de escrito, con lo cual para el 17 de marzo tanto Maurice Wilkins como Rosalín Franklin estarían enterados del nuevo modelo de Watson y

Crick. En esta ocasión la reacción de Wilkins y Franklin sería diferente a la que dieran en noviembre de 1951. Desde sus primeros momentos de aparición, el modelo de Watson y Crick tendría, por parte de los miembros del grupo fago, el visto bueno que habría de ser el preludio de su aceptación.

Detrás de la aceptación del modelo de la doble hélice de Watson y Crick se encuentra, de acuerdo a la reconstrucción kuhnsana que de ella intentamos en la última sección del siguiente capítulo, el momento culminante de la revolución científica iniciada por los trabajos de Avery: Con el modelo de la doble hélice se pone en evidencia la función genética del ADN, lográndose, con ello, persuadir y convertir al nuevo paradigma a aquellos que se resistieron a ver en el ADN la sustancia genética.

CAPITULO 3

UNA MICROREVOLUCION EN LA BIOLOGIA MOLECULAR

Aunque fueran varias las ciencias que participaran tanto en la identificación de la sustancia genética como en el descubrimiento de su estructura molecular, ninguna habría de experimentar un cambio tan notable por dichos acontecimientos como la biología molecular. Y es que dichos eventos habrían de revolucionar, en un sentido kuhniano, la visión que se tenía del gen. Con la identificación del material genético y el descubrimiento de su estructura molecular las preferencias del biólogo molecular por considerar a una de las dos sustancias nucleoproteínicas como sustancia genética pasan, por un lado, de la proteína al ADN y, por otro, se materializa el concepto del gen, esto es, se reconoce a una entidad física como responsable de las funciones genéticas, haciendo posible que, al tener entre sus manos la sustancia genética y poder manipularla, la biología molecular obtenga el status de una auténtica ciencia experimental. Por el contrario, para la física y la química (que fueran de las ciencias que jugaran un papel decisivo en estos dos acontecimientos), el que fuera la proteína o el ADN la sustancia genética, en nada afectaría sus bases teóricas o, en términos de Kuhn, sus paradigmas. De ningún modo estuvo en juego, para estas ciencias, el quedarse con determinados paradigmas o renunciar a ellos si fuera la proteína o el ADN la sustancia genética. Tal es así que, por ejemplo, según lo que se vió en la última sección del capítulo anterior, la determinación de la estructura del ADN en base a principios estereoquímicos habría de realizarse en tan solo seis semanas. O en el caso de la derivación

de la teoría de la difracción helicoidal a partir de la teoría de la difracción de Fresnel en un fin de semana por parte de Francis Crick. La prontitud con la que Crick obtuviera la teoría de la difracción helicoidal y la prontitud con la que se descubriera la estructura del ADN aplicando principios estereoquímicos, bien parece sugerir, como herramientas aportadas por la física y la química a la biología molecular, que estas ciencias tuvieron una participación normal (en el sentido Kuhniano del término) en la resolución del problema de la determinación de la estructura del ADN. Mas aún, al quedar definida la identidad de la sustancia genética como ADN y al quedar en claro cómo éste se reproduce en base a su estructura, el anhelo de Niels Bohr de encontrar nuevas leyes físicas en el estudio de la biología se vio frustrado. Al conocerse la identidad y estructura de la sustancia genética, el enfoque conservador de Erwing Schrodinger de explicar los fenómenos de la vida en base a las leyes de la física ya establecidas" (Cfr. Olby, El camino hacia la doble hélice, págs. 331-386) se vería fortalecido. De modo que, por lo que respecta a la física, ésta no habría de sufrir modificación alguna por el establecimiento de la identidad y estructura de la sustancia genética.

Pero para comprender el impacto revolucionario que tuvo en la biología molecular el paso de la proteína al ADN como sustancia genética, es necesario precisar que, como su nombre lo indica, ésta aborda el estudio de la vida como una función de la organización molecular de la materia. De este modo, para la biología molecular, los seres vivos, al igual que cualquier otro ser inanimado, está constituido por moléculas. Dichas moléculas, en su comportamiento como entidades materiales, se ajustan a todas las leyes físicas y químicas que rigen el comportamiento de la materia inerte. Para la física y la química, por lo tanto, las leyes que rigen en la materia

inanimada son las mismas que rigen en la materia animada. Como entidades materiales animados, tanto la proteína como el ADN están subordinados a la mismas leyes físicas y químicas que gobiernan a la materia inanimada; razón por la cual ni la física ni la química estarían en posición de cambiar al pasar de la proteína al ADN como sustancia genética. Si la biología molecular se limitara a ser un estudio físico o químico de la vida, el paso de la proteína al ADN como sustancia genética en nada le habría afectado. Sin embargo, para la biología molecular, la materia animada es algo más que una entidad física o química, es una entidad que manifiesta signos de vida, esto es, que realiza funciones que puedan caracterizarse de vitales en los seres vivos. Desde este punto de vista, es completamente legítimo, en el campo de la biología molecular, preguntarse por la función que desempeña una determinada molécula en determinado o determinados organismos vivos. Por ejemplo, los seres vivos presentan la capacidad de extraer y transformar la energía de su entorno a partir de materias primas sencillas (una manzana o cualquier otra cosa que sirva de alimento), y de emplearla para edificar y mantener sus propias e intrincadas estructuras. La materia inanimada, por el contrario, carece de esta capacidad o función de la materia animada para emplear la energía externa para mantener su organización estructural. Para la biología molecular, esta capacidad vital de los seres vivos se ha de explicar como una función de determinadas sustancias químicas o, más precisamente, de sus moléculas. Desde este modo, la biología molecular puede definirse como el estudio de las propiedades fundamentales o esenciales de los seres vivos, tales como la reproducción y el crecimiento, como funciones de estructuras moleculares; según se establece en su postulado fundamental: "Todos los procesos y fenómenos biológicos pueden explicarse en términos moleculares" (Laguna J., Bioquímica, ed. La Prensa Médica Mexicana, México 1971, pág.

1). Dado que, para la biología molecular, por lo que se puede apreciar en su postulado fundamental, existe una correspondencia entre las funciones biológicas y las moléculas de las sustancias biológicas, es fundamental establecer la identidad de la sustancia que detenta tal o cuales funciones. Para esta ciencia, pues, no fue cualquier cosa el que se señalara, en un primer momento, a la proteína como sustancia genética y, posteriormente, se abandonara dicho señalamiento. El paso de la proteína al ADN como sustancia genética ha venido a ser, sin duda alguna, en la historia de la biología molecular, un cambio que, por la relevancia de la función biológica que se investigaba, entre otras cosas, es, en el sentido kuhniano del término, una auténtica revolución científica para esta ciencia, es decir, una microrevolución.

Y es que, de todas las funciones que realiza cualquier organismo vivo, la más sorprendente es su función reproductora, que no es otra cosa mas que la capacidad que muestra todo organismo vivo de reproducir una réplica de sí mismo. Para la biología molecular, esta función genética, al igual que cualquier otra función que manifiestan los organismos vivos, ha de entenderse como una función de una determinada clase de moléculas, esto es, de una molécula que, aunque presenta características propias en cada una de las especies vivientes, en cada una de ellas ha de ser la responsable de la misma función. De modo que, para esta ciencia, establecer la identidad de la sustancia a la que corresponde la función genética no era un propósito mas a alcanzar. Se trataba de su más relevante labor que habría de realizarse en el estudio de la vida.

Dentro del trabajo científico encaminado a identificar la sustancia genética, el modelo de la estructura molecular del ADN de James Watson y Francis Crick habría de ser decisivo en la determinación de la identidad del

material genético. Establecida la identidad de la sustancia genética como ADN, no había cabida a seguir manteniendo la idea que durante tanto tiempo predominó en la cabeza de los biólogos moleculares. El Modelo de la doble hélice de Watson y Crick vino a dejar en claro lo que otros tantos trabajos habían venido señalando y a lo que los biólogos moleculares se habían venido resistiendo adoptar, que las funciones genéticas de la reproducción y de la especificidad biológica corresponden al ADN. El modelo Watson-Crick, al ser un trabajo decisivo en la identificación de la sustancia genética como ADN, es la etapa culminante en el proceso revolucionario que conduce del paradigma que considera a la sustancia genética como proteína al paradigma que la considera como ADN.

EL PARADIGMA DE LA PROTEÍNA COMO SUSTANCIA GENÉTICA

La biología molecular, entendida como la explicación de los procesos o funciones biológicas en términos de moléculas, no es una creación de este siglo XX. Ya en la segunda mitad del siglo anterior, Kekulé echaba mano de ésta cuando "intentó describir procesos fisiológicos en términos químicos" (Olby, El camino hacia la doble hélice, pág. 34). Sin embargo, no es sino hasta el siglo XX que logra consolidarse como ciencia. Por un lado, el concepto sobre el que se basan sus explicaciones, el concepto de macromolécula, queda plenamente establecido como un logro de la ciencia de la química; y, por otro lado, alcanza a resolver lo que podría considerarse como el más relevante de sus problemas: determinar la identidad y estructura de la sustancia genética.

Una vez que la biología molecular asimiló el concepto de macromolécula, como piedra angular de sus explicaciones, hubo de suscitarse, a su interior, una revolución científica para que se lograra identificar a la sustancia genética como ADN. Una vez asimilado el concepto de macromolécula, lo que a esta ciencia le quedaba por delante era superar su resistencia a considerar a una sustancia menos compleja -en casi todos los aspectos en los que se le comparaba- que la proteína. Y es que, desde que la biología molecular asimiló el concepto de macromolécula, su candidato más obvio a ser la sustancia genética, por el cual la mayoría de los miembros de su comunidad mantuvieron sus simpatías hasta 1953, era la proteína. Para la biología molecular, la consideración de la proteína como sustancia genética representó, como a

continuación veremos, un auténtico paradigma, un paradigma al que el modelo de la doble hélice de Watson y Crick ayudaría a sustituir de una buena vez y desde entonces.

Si bien para la biología molecular el estudio de los procesos o funciones biológicos no se ubica por encima o debajo del nivel molecular, sino tan sólo a nivel de las moléculas, ello no significa que deba hacerse a un lado los átomos que integran las moléculas. La biología molecular considera al átomo como parte de sus investigaciones cuando éste forma parte de un conglomerado de átomos, esto es, cuando forma, junto con otros átomos, moléculas. Al ubicar la explicación de los procesos biológicos a nivel de las moléculas, no basta, para la biología molecular, con saber que los átomos que se presentan en las sustancias que manifiestan una función vital son el carbón, el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno, el azufre o el fósforo (pues estos son elementos que se presentan en cualquier clase de materia orgánica); es necesario, además, saber la disposición espacial que guarda cada átomo con respecto a los demás con los que conforma una molécula. Y es que una molécula es, fundamentalmente, un conglomerado de átomos dispuestos de una manera específica en el espacio. De ahí que, junto con el tamaño, se considere a la "forma como una propiedad fundamental de las moléculas" (Morrison y Boyd, Química orgánica, pág 1145). La relevancia de conocer la distribución de los átomos que conforman una molécula, esto es, su estructura molecular, se basa en la idea de que en ésta radica la función que manifiesta determinada sustancia. El papel que juega la estructura molecular para con la función que presenta una determinada sustancia se puede comparar, a manera de ejemplo, con el papel que juega la rueda en los vehículos terrestres. Ninguna forma puede ser utilizada tan eficientemente para rodar como la circular. La posición que ocupan los átomos dentro de la molécula es tan fundamental en la

propiedades que manifiesta una sustancia que el cambio de posición de alguno de sus átomos modifica notablemente las propiedades de ésta, tal y como se aprecia en la siguiente definición de isómeros: "Los isómeros son sustancias de igual composición química y con diferentes propiedades físicas y químicas" (Llera D. Eduardo, Temas para un futuro biólogo, pág. 246). Dentro de los tipos de isomería, destaca la isomería estructural, la que se define como "isómeros con la misma fórmula molecular, pero con diferentes estructuras" (Llera, op. cit., pág. 246). En correspondencia con estas ideas, la biología molecular considera que "los fenómenos biológicos son la manifestación de sucesos que ocurren en las moléculas que forman un célula, un tejido, o un órgano, y dichos sucesos moleculares, a su vez, no son sino el resultado de transformaciones químicas bien definidas" (Laguna J., Bioquímica, pág. 2); de transformaciones químicas que dependen en gran medida de la estructura que tengan las moléculas de las sustancias que interactúan. Ubicar la explicación de los procesos o funciones biológicas a nivel de las moléculas, para la biología molecular, significa específicamente ubicarla en la estructura molecular que conforman los diferentes átomos que la integran.

Así pues, dado que las funciones biológicas, según el postulado de la biología molecular, se ubican en un aspecto que es tan esencial en la identidad de una sustancia -esto es, un aspecto del que depende lo qué es la sustancia en cuanto entidad física y química-, el ver a una determinada sustancia como responsable de una función específica es tan fundamental en la forma de proceder de esta ciencia que, al ver cualquier otra sustancia como responsable de esta misma función, trastocaría necesariamente el trabajo que al interior de ella se realiza. Es por ello que, para la biología molecular, la idea de que la proteína es la sustancia genética representó o fue, de acuerdo al marco teórico de Kuhn, un paradigma que determinaría una manera de

trabajar en una etapa de su historia. En la idea de la proteína como sustancia genética hay tanto una forma de ver o entender la identidad de la sustancia genética como una manera establecida de resolver problemas de genética (una concreta solución de problemas genéticos).

De los fenómenos biológicos, el más complejo, conforme a lo señalado en la primera sección del segundo capítulo, es el fenómeno de la herencia. Al fenómeno de la herencia está asociada la especificidad biológica de más de un millón y medio de especies vivientes (sin considerar las que se han extinguido), cada una de las cuales, según la teoría de la evolución, procede de un ancestro común y, por ello mismo, de una misma molécula. Las especies vivientes son el producto, en la evolución, de una ramificación de mutaciones de dicha molécula. Cada especie viviente, de este modo, responde a una configuración específica de dicha molécula. Pero, aunada a la gran cantidad de especies vivientes, la individualidad de los seres vivientes de cada especie provee a esta molécula de una mayor versatilidad en su diversificación de configuraciones. Dicha molécula además de conservar la configuración que corresponde a cada especie, ha de tener variantes, en el margen de la configuración de cada especie, que correspondan a cada uno de sus individuos. La gran diversidad de especies vivientes e individuos de cada una de ellas, hizo ver en la sustancia genética, hasta 1953, una sustancia altamente diversificante por su composición, es decir, como una sustancia con una gran variedad de aspectos que, en su combinación, determinarían una gran variedad de formas de vida e individuos. Sin duda, esta inclinación obligada de la biología molecular por atribuir la compleja función genética a una sustancia que tuviera igual complejidad en su composición molecular, proporcionaría a esta ciencia el paradigma en el que se veía a la proteína como la sustancia genética.

Uno de los aspectos más relevantes del paradigma, conforme a lo que se estableció en la primera sección del primer capítulo, es el de paradigma como forma de ver, la que tiene que ver tanto con la construcción de imágenes perceptuales como la construcción de imágenes conceptuales. En este sentido, por el paradigma el científico no sólo percibe imágenes específicas de aquello que está frente a sus ojos, sino que además construye imágenes teóricas específicas de aquello que razona con su pensamiento. Es sobre todo en este segundo aspecto de la forma de ver en la que se puede ubicar, inicialmente, como paradigma a la idea de la proteína como sustancia genética.

En efecto, la idea de la proteína como sustancia genética corresponde a una forma específica de ver o entender la complejidad molecular en la que se sustenta la función genética de la sustancia genética. Conforme a lo que se indicó en la tercera sección del segundo capítulo, de las dos sustancias nucleoproteínicas, la que se mostraba con mayor complejidad a la mirada y comprensión del biólogo molecular era la proteína. Por un lado, la cantidad de submoléculas que constituyen a cada una de las sustancias nucleoproteínicas favorece notablemente, en cuanto complejidad, a la proteína. Mientras que el ADN está compuesto de tan solo cuatro submoléculas (adenina, guanina, timina y citosina), la proteína está compuesta de veintidos aminoácidos. En este aspecto, si la especificidad biológica de las especies y sus individuos correspondía, como desde entonces se pensaba, a una combinación específica y regular de las submoléculas que constituyen a la macromolécula genética, la proteína aventajaba al ADN. Es decir, era más plausible un código genético, que explicase la gran diversidad de especies e individuos, inscrito en veintidos aminoácidos que en cuatro nucleótidos. En correspondencia con la compleja función genética, la complejidad de la

proteína por sus veintidos aminoácidos, entre otros aspectos, hacía ver en esta sustancia al material genético. Para la biología molecular, la sustancia genética, por la complejidad de su función, tenía que ser la sustancia que mostrase una mayor complejidad o diversidad de submoléculas constituyentes.

Aunada a la mayor cantidad de submoléculas que pueden constituir a las proteínas, las dimensiones macromoleculares que mostraban éstas frente al ADN fue otro factor que contribuyó a forjar y mantener por varios años la visión o idea de que la proteína era la sustancia genética. En virtud a la notable fragilidad que presenta la macromolécula del ADN no fue posible reconocer la naturaleza macromolecular de esta sustancia antes de 1938, año en el que el propio Levene desecharía su teoría del tetranucleótido. Antes de 1938, la longitud de la cadena del ADN, frente a la cadena de la proteína, carecía de una dimensión que hiciera considerarla como sustancia genética. Sin embargo, a pesar del reconocimiento de la naturaleza macromolecular del ADN, no fue posible reconocer, por algunos años más, cadenas de ADN que tuvieran una mayor longitud que las cadenas de proteína. De este modo, no era factible ver como sustancia genética a una sustancia con tan solo cuatro submoléculas integrantes y una longitud de cadena de inferior dimensión a la cadena de la proteína. La comparación cuantitativa de estos dos aspectos, trajo consigo una clara desventaja del ADN frente a la proteína, desventaja que inclinaría la balanza a favor de la idea de la proteína como sustancia genética. A juzgar por estos dos aspectos, no había algo menos descabellado que pensar que la sustancia genética era la proteína, sustancia que parecía acoplar perfectamente, por su complejidad molecular dada por estos aspectos, a la compleja función genética.

Es claro que, como construcción conceptual, la idea de la proteína como sustancia genética es un auténtico paradigma de la biología molecular. Como

forma de ver, esta idea es una manera de entender o comprender la naturaleza de la sustancia genética. La complejidad derivada de estos dos aspectos de la estructura molecular de la proteína sería la premisa fundamental que conduciría a conceptualizar o forjar la imagen teórica de la proteína como sustancia genética. Al entendimiento de la mayoría de los biólogos moleculares, la proteína presentaba la complejidad o los rasgos moleculares que corresponden a la de la sustancia genética. La idea de la sustancia genética - que describimos en la segunda sección del segundo capítulo-, aunada al concepto de complejidad molecular como cantidad de submoléculas diferentes que pueden constituir a una macromolécula y la longitud que tenga la cadena de ésta son dos categorías conceptuales que sostendrían la imagen teórica de la proteína como sustancia genética.

Con el paradigma de la proteína como sustancia genética, los biólogos moleculares no sólo entendían que esta sustancia fuera la portadora y encargada de transferir la información genética, sino además veían en ésta manifestarse la función reproductora de la sustancia genética. Al entendimiento y mirada del biólogo molecular, los virus, bacteriófagos y enzimas, que son entidades biológicas de considerable naturaleza proteínica, se comportan como la sustancia genética. Por ejemplo, en la teoría un enzimática del gene, los enzimas, que son cien por ciento de naturaleza proteínica, se consideran como los genes o factores mendelianos que determinan los caracteres que presentan los organismos, tales como el color de piel o pelo.

Como paradigma o forma de ver, la idea de la proteína como sustancia genética es la conceptualización y percepción que teoriza y ve en esta sustancia la función genética. Sin embargo, un paradigma no sólo es una forma específica de ver; es también una concreta solución de problemas. El afán de

ver en la proteína la función genética, que es fundamentalmente una función reproductora, responde a la complejidad molecular que presenta esta sustancia. Las dos docenas de aminoácidos que pueden constituir a las proteínas, frente a los cuatro nucleótidos que constituyen a todo ADN, explicaban la gran variedad de formas de vida que habitan este planeta. A los ojos del biólogo molecular, una sustancia altamente diversificante como la proteína podía explicar la gran diversidad de formas de vida; esto es, a cada especie viviente, le correspondía una proteína específica. Para los biólogos moleculares, la especificidad biológica de una especie viviente se encuentra en la especificidad de la proteína, es decir, a una cantidad y variedad determinada de aminoácidos y a una secuencia específica de los mismos. El problema de la especificidad biológica era resuelto, en el paradigma de la proteína como sustancia genética, estableciendo, para cada especie viviente, una secuencia específica de aminoácidos. De este modo, al reproducirse de generación en generación los individuos de una especie viviente, se reproduce, de acuerdo a este paradigma, la secuencia de aminoácidos que determina a la especie. La secuencia específica de aminoácidos para cada especie viviente es la concreta solución que ofrece el paradigma de la proteína como sustancia genética al problema de la especificidad biológica.

UNA ANOMALIA Y UNA CRISIS EN LA BIOLOGIA MOLECULAR

Una vez que Avery hubo de aceptar la teoría de la transformación bacteriana de Griffith —según la cual bacterias de forma R y de un tipo específico (I, II, III o IV) podrían transformarse en la forma S y en algún otro tipo específico—, se dió a la tarea de identificar a la sustancia responsable de dichas transformaciones. O más bien, dado que en la atmósfera de trabajo de Avery se respira el paradigma de la proteína como sustancia genética, se daría a la tarea de corroborar algo que se daba por hecho desde los "trabajos del propio Griffith" (Olby, El camino hacia la doble hélice, pág. 266), que la sustancia, cuya mutación daba origen a las transformaciones bacterianas, no era otra mas que proteína. Sin embargo, los resultados de este trabajo "tomarían por sorpresa a Avery" (Olby, op. cit., pág. 263), al concluir que la sustancia transformadora era ADN y no proteína como se esperaba.

En los actuales libros de texto de genética, como por ejemplo los consultados en el presente trabajo, se considera como año de identificación de la sustancia genética el año de 1944, año en el Avery llegara a la conclusión subdicha. Empero, considerar el año de 1944 como el año en el se establece la identidad de la sustancia genética como ADN obedece a una tendencia del científico a "ver el pasado de su disciplina como un desarrollo lineal hacia su situación actual" (Kuhn, La estructura de las revoluciones científicas, pág. 215), a la que Kuhn denomina como la invisibilidad de las revoluciones. Por esta tendencia, el actual biólogo molecular ignoraría el

proceso revolucionario que se suscitó en su disciplina científica, del cual los resultados del trabajo de Avery representan tan sólo una etapa. Con la misma sorpresa que tomaría Avery los resultados de su trabajo, los tomarían el resto de la comunidad científica involucrada en este asunto, la cual habría de resistirse a aceptarlos durante los siguientes ocho o nueve años. Prueba de ello es que, por ejemplo, el 1951 Salvador Luria —que junto con Max Delbrück fuera cabeza del grupo fago—, enviara a James Watson a estudiar química, a fin de identificar por vía de ésta a la sustancia genética (véase el capítulo 2, sección II de este trabajo). Por las reservas que tuvieron los biólogos moleculares hasta 1953 de tomar, con el modelo de la doble hélice, como sustancia genética al ADN, no puede considerarse como año en el que se establece la identidad de la sustancia genética el año de 1944. La tardía aceptación de los resultados del trabajo de Avery deja entrever que no se trataban de la última palabra en cuanto a la identidad de la sustancia genética. Pero si los resultados del trabajo de Avery no fueron definitivos, esto es, que finalmente se resolviera con ellos el problema de la identidad del material genético; entonces ¿qué papel jugaron dentro del proceso revolucionario que destronaría al paradigma de la proteína como sustancia genética; pues, de acuerdo al marco teórico kuhniano, el paso de la proteína al ADN como sustancia genética es, sin duda, una revolución o, más precisamente, una microrrevolución científica? A diferencia de otros acontecimientos o hechos que estuvieran en franca oposición a lo previsto por el paradigma de la proteína como sustancia genética —como por ejemplo los resultados del trabajo de mutagenesis realizados con radiación ultravioleta, los cuales indicaban como sustancia mutante al ADN, que mutaba al absorber la radiación ultravioleta, indicación que se superó con la teoría de la transferencia de energía que se describió en la sección cuatro del capítulo

dos-, los señalados en los resultados del trabajo de Avery dan pie a una anomalía que no podría ser superada mientras no se desarrollaran las categorías conceptuales y perceptuales de un nuevo paradigma, esto es, mientras no madurara el paradigma que habría de sustituir al viejo paradigma de la proteína como sustancia genética. Resultados como los del trabajo de Avery, que anuncian un descubrimiento novedoso -que rompe con las "expectativas, inducidas por el paradigma, que rigen a la ciencia normal" (Kuhn, Op. cit.,pág. 93), no pueden aceptarse, por su naturaleza anómala, al momento de darse a conocer. A este respecto Kuhn señala: "El descubrimiento comienza con la percepción de la anomalía. A continuación, se produce una exploración más o menos prolongada de la zona de la anomalía. Y sólo concluye cuando la teoría del paradigma ha sido ajustada de tal modo que lo anormal se haya convertido en lo esperado" (Idem). Si los resultados del trabajo de Avery no se aceptaron al momento que éste los diera a conocer, es porque se trataban de una anomalía que los biólogos moleculares no podrían ignorar por mucho tiempo, pues se trataba de una anomalía que afectaba al corazón mismo del paradigma de la proteína como sustancia genética.

En el año de 1944, sólo seis años después de que se reconociera la naturaleza macromolecular del ADN, no había la menor expectativa de que esta sustancia de tan sólo cuatro submoléculas constituyentes fuera la sustancia responsable de las transformaciones bacterianas o, en vista de que a la transformación bacteriana se le consideraba un ejemplo de mutación, de la función genética propia del gene. Durante este año, en el que la rectoría del paradigma de la proteína como sustancia está presente en el trabajo del biólogo molecular, todas las expectativas acerca de la identidad de la sustancia transformadora estaban puestas en la proteína. La sustancia transformadora no podía ser otra mas que ésta; de ahí que uno de los primeros

pasos de Avery, en su intento de identificarla, fuera directamente hacia la proteína; esto es, conocido de que ésta era la sustancia transformadora, sometería, en primer lugar, a la sustancia antigénica, en la que se encuentra confinada la actividad transformadora en alguna de las dos sustancias nucleoproteínicas, a la acción de enzimas que desnaturalizan a proteínas. Bajo el paradigma de la proteína como sustancia genética, Avery esperaba que, al desnaturalizar la proteína de la sustancia nucleoproteínica, desapareciera o desactivara la acción transformadora de ésta. Sin embargo, para sorpresa de Avery, la tripsina y quimotripsina, que lograban desnaturalizar a la proteína nucleoproteínica, no lograban desactivar la actividad transformadora del agente transformador. La sorpresa de Avery aumentó cuando notó que la acción transformadora de la sustancia antigénica quedaba desactivada al someterla a la acción de un enzima que se extraía de la mucosa intestinal secretada por un perro, que era una ADNasa que desnaturalizaba al ADN. La observación de que era el ADN, y no la proteína, la sustancia transformadora daba paso a un hallazgo imprevisto por el paradigma de la proteína como sustancia genética, esto es, a una auténtica anomalía dentro del campo de la biología molecular.

Dado que los resultados del trabajo de Avery iban directo al corazón del paradigma de la proteína como sustancia genética, su presencia, en el escenario de la biología molecular, desembocaría en una crisis que daría paso a un nuevo período de evolución de esta ciencia, a un nuevo paradigma que habría de presidir el trabajo científico en esta disciplina. De acuerdo a Kuhn, uno de los síntomas de las crisis en la ciencia son, entre otras cosas, "la expresión de descontento explícito, el recurso a la filosofía y el debate sobre los fundamentos" (véase sección cuatro del capítulo dos de este trabajo). Sin duda, el trabajo de Avery suscitó un descontento explícito que se manifestó en la crítica que le hiciera Misky, una crítica que, a primera

vista, cuestionaba la capacidad de un médico para hacer química y, por ende, el procedimiento utilizado por éste para obtener sustancia transformadora. A los ojos de un químico como Misky, que había dedicado gran parte de su vida profesional al estudio de la química del cromosoma, los métodos utilizados por un médico para separar al ADN de la proteína e identificar de esta manera la sustancia transformadora eran nada fiables. En el fondo, sin embargo, esta crítica se ubica en un ámbito filosófico; pues se trata de cuestionamiento a la capacidad cognoscitiva con la que cuenta la medicina para llegar a conocer el aspecto químico de los fenómenos que aborda el médico. En este sentido, para Misky, Avery y sus colegas médicos carecían de las técnicas químicas apropiadas para caracterizar a la sustancia transformadora. Para Misky, "la caracterización de la sustancia transformadora como ADN padecía del defecto de estar apoyada en la técnica del desoxicolato sódico como medio para separar al ADN de la proteína, que, a los ojos de este químico, no liberan al ADN por completo de la proteína" (Olby, El camino hacia la doble hélice, págs. 287-291). Para Misky quedaba, pues, la alternativa de que la proteína residual, ligada al ADN, fuera altamente activa e indujera la transformación bacteriana. En la defensa del paradigma de la proteína como sustancia genética, Misky entraba en disputa con Avery en cuanto a la validez que tenía la técnica del desoxicolato sódico como medio para llegar a caracterizar o conocer la identidad de la sustancia transformadora, esto es, en una disputa epistemológica o, por ende, filosófica.

Pero más que los síntomas propios de una crisis científica, lo que caracteriza como tal a la situación en la que queda la biología molecular con los resultados del trabajo de Avery es que la concreta solución que ofrecía el paradigma de la proteína como sustancia genética al problema de la especificidad biológica deja de operar. El señalamiento que hiciera el trabajo

de Avery en favor del ADN como sustancia genética, el cual no sería desmentido por la crítica de Miesky a Avery -sino que, al contrario, encontraría su corroboración en los "trabajos de André Boivin con el bacilo del colon *Escherichia coli*" (Diby, op. cit., págs. 297-302)-, ponía en entredicho la posibilidad de que la especificidad biológica de cada especie y cada uno de sus individuos se encontrara en una secuencia específica de aminoácidos. Con la discusión entorno a la transformación bacteriana y la corroboración que hiciera Boivin de los resultados del trabajo de Avery, la esperanza de explicar la especificidad biológica en la secuencia de aminoácidos de las proteínas cesó, cediendo su lugar a una nueva solución: la secuencia de nucleótidos en el ADN. Ello, sin embargo, no significaba que se aceptara al ADN como la sustancia genética. En este contexto, el que el ADN pudiera ser la sustancia genética se tomaba no como un hecho, sino como una posibilidad que habría de explorarse antes de tomar una actitud ante ella, dando paso a una etapa propiamente revolucionaria en la biología molecular, en la que se habría de ensayar la nueva solución al problema de la especificidad biológica y de la que forma parte los trabajos de Chargaff y los de Watson y Crick.

LA SUPERACION DE UNA CRISIS

A juzgar por la descripción que se hiciera de la situación en la que caería la biología molecular con el trabajo de Avery, bien pareciera que ésta fuera cualquier cosa, menos una crisis científica. De no ser porque, en efecto, la situación en la que queda la biología molecular con el trabajo de Avery reúne características que Kuhn señala como propias de un estado de crisis en la ciencia, podríamos dudar de que se trata de una crisis científica. El paso de la secuencia de aminoácidos de la proteína a la secuencia de nucleótidos en el ADN como solución al problema de la especificidad biológica —que junto al problema de la reproducción genética hace el problema de la identidad de la sustancia genética— parece carecer, en el ánimo de los biólogos moleculares, de la sensación de incertidumbre propia de las crisis. Bien parece que el abandono de la solución concreta al problema de la especificidad biológica que ofrecía el paradigma de la proteína como sustancia genética, en nada afectara las esperanzas de los biólogos moleculares de continuar trabajando en el desarrollo de su disciplina. El afán de intentarlo todo, propio de quien carece de identidad o rumbo, propio de quien vive en un estado de crisis, no se hace presente en la crisis que suscita el trabajo de Avery en la biología molecular. Si el biólogo molecular no manifiesta plenamente la sensación de incertidumbre —un vacío por abandonar la secuencia de aminoácidos como explicación a la especificidad biológica— y no se da a la tarea de ensayarlo todo; es porque no tiene ante sí una indeterminada cantidad de alternativas que considerar como posibles

soluciones al problema que el viejo paradigma no ha podido solucionar. La pronta superación de la crisis o estado de desesperanza que caracterizan a éstas se debe, al parecer, a que la naturaleza del problema que enfrentaba la biología molecular no daba lugar mas que a una de las siguientes dos alternativas: 1) que el ADN fuera la sustancia genética, o 2) que la sustancia nucleoproteínica en su conjunto lo fuera. La superación, pues, de la crisis se daría al momento que se reconoce a alguna de estas dos alternativas como posible solución a la anomalía suscitada por los trabajos de Avery, cuando se reconoce la posibilidad de seguir trabajando dentro de la biología molecular bajo la tutela de alguna de ellas. De estas dos alternativas, la de la sustancia nucleoproteínica como sustancia genética es una solución que, en cierto sentido, "se venía ensayando desde los trabajos de mutagénesis, unos cuantos años antes de que la biología molecular entrara en estado de crisis" (Ibídem, págs. 249-256). Estos trabajos concedían un papel genético al ADN, pero secundario. La actitud de mantener la primacía de la proteína sobre el ADN, en la función genética, haría que se pensara en la alternativa de que la sustancia genética fuera de naturaleza nucleoproteínica, es decir, que la sustancia genética fuera una conjunción de proteína y ADN. De acuerdo a esta alternativa, sólo la unidad de estas dos sustancias hace la sustancia genética. Pero más que una alternativa para superar la crisis suscitada por el trabajo de Avery, la idea de la sustancia genética como nucleoproteína parece el último recurso por mantener en pie al paradigma de la proteína como sustancia genética -pues aunque concede al ADN un papel genético junto a la proteína, es un papel secundario-. Pero si la idea de la sustancia genética como nucleoproteína fuera, en todo caso, una auténtica alternativa para solucionar una anomalía, aún ésta quedaba descartada por los resultados del trabajo de Avery: no indicaban que fuera

una nucleoproteína la sustancia transformadora; lo que indicaban es que era ADN. Es más, el propio Avery descarta esta alternativa cuando señala que "el ADN era mucho más que una simple molécula matrona, un marco estructural; porque se muestra funcionalmente activo al determinar las actividades bioquímicas y las características específicas de las células neumocóccicas" (Ibidem, pag. 282). En este sentido, para quienes habrían de asumir una actitud revolucionaria ante los resultados del trabajo de Avery, no había más alternativa para superar la crisis en la que se encontraba inmersa la biología molecular que tomar por hecho que el ADN fuera la sustancia transformadora. Sin embargo, para quienes se afanaban por conservar la imagen que dibuja a la proteína como la sustancia fundamental y primaria en las funciones genéticas, no quedaba otro recurso que mantener unida la proteína al ADN. Para éstos, el que el ADN apareciera con una función genética no significaba que fuera la función principal; aún quedaba la posibilidad de que, detrás del papel genético que manifiesta esta sustancia, se escondía la proteína con la función genética que se le atribuyera de antemano.

Con la superación de la crisis, se da paso a un período revolucionario en el que el paradigma de la proteína como sustancia genética, bajo una nueva forma, entra en pugna con el naciente paradigma del ADN como sustancia genética por conservar su papel rector dentro de la biología molecular. Los simpatizantes de uno u otro paradigma habrían de realizar, durante esta etapa revolucionaria en la biología molecular, una serie de investigaciones tendientes a fortalecer su postura.

Entre quienes mantendrían una postura conservadora o conservarían la esperanza de que una pequeña porción de proteína, imperceptible por las técnicas usadas por Avery en el estudio de la sustancia transformadora, fuera, por su alta actividad, la responsable de la función genética

fundamental, se encuentran Alfred Hershey, cuyo trabajo sobre la identificación de la sustancia transformadora describimos en la sección seis del capítulo dos, y Salvador Luria, quien consideraba que "un citoplasma del ADN que se incorporaba a las unidades genéticas de la proteína del fago durante el horneado final de partículas fágicas" (Ibidem, pág. 451) fuera lo que explicara el ADN del que daban cuenta los experimentos de Avery. Con la esperanza de detectar la proteína que los procedimientos de Avery no eran capaz de captar, Hershey habría de desarrollar la estrategia de identificar la sustancia transformadora mediante el estudio del mecanismo de la transformación bacteriana. En este mecanismo, el bacteriofago actúa como una jeringuilla hipodérmica, que inyecta al interior de la célula anfitriona la sustancia transformadora. Al planear y realizar sus experimentos con marcadores radiativos, la esperanza de Hershey era la de encontrar, una vez que el fago invadía a la célula anfitriona, "los isótopos de azufre al interior de ésta" (Ibidem, pág. 452), lo cual demostraría que la proteína - cuyo elemento distintivo es el azufre - es la sustancia transformadora. El trabajo de Hershey a este respecto se inscribe en una etapa revolucionaria de la biología molecular. Se trata de un trabajo de ciencia extraordinaria que pretendía sobreguardar la credibilidad del paradigma de la proteína como sustancia genética frente a la amenaza de un nuevo paradigma que el propio trabajo de Avery insinuaba.

Entre quienes abrazaron los resultados del trabajo de Avery como una teoría que prometía, por un lado, resolver la anomalía que había dado origen a la crisis que enfrentaba la biología molecular y, por otro, imprimirle a esta ciencia un vigoroso desarrollo se encuentran Erwin Chargaff, a quien se debe la proporción uno a uno entre adenina y timina y entre guanina y citosina. A diferencia de Hershey y Luria, Chargaff tomaría los resultados

del trabajo de Avery como una prometedora línea de trabajo que habría que seguir a la brevedad con todos los recursos a su alcance: "En 1944 Avery, McLeod y McCarty publicaron su célebre trabajo sobre el principio de la transformación de los neumococos. Esto supuso realmente la influencia decisiva, en lo que a mí (Chargaff) concierne, para dedicar nuestro laboratorio casi por completo a la química de los ácidos nucleicos" (Vid Ibidem, pág. 315). La meta que perseguía Chargaff al conducirse por el camino sugerido por Avery, era la de fortalecer el trabajo de éste, esto es, hacer plausible, a los ojos del resto de la comunidad de los biólogos moleculares, la imagen que se dibuja, en este trabajo, del ADN como sustancia transformadora o genética. La labor científica de Chargaff, a este respecto, fue la de aclarar la imagen del ADN que presentaba el nuevo paradigma sugerido en el trabajo de Avery, retirando algunos obstáculos teóricos del viejo paradigma que la opacaban. El propósito fundamental de Chargaff a este respecto fue la revisión de la teoría del tetranucleotido de Levene. Si bien Levene dio el primer paso que conduciría al cambio de imagen del ADN, al considerar a esta sustancia como una sustancia de naturaleza macromolecular, él mismo había de entorpecer uno de los más importantes pasos que habría de darse en el camino hacia el nuevo paradigma. Su teoría del tetranucleotido consideraba al ADN como una sustancia pobre en diversidad, es decir, como una sustancia que se compone, a lo largo de toda su cadena, de una misma unidad compuesta de cuatro nucleótidos. De acuerdo a esta visión de Levene, el ADN era una sustancia a la que difícilmente se le podría considerar como la sustancia que contiene la información genética que determina la especificidad biológica de cada especie viviente. Para Chargaff, si el ADN era la sustancia transformadora, la teoría de tetranucleotido de Levene podía ser criticada y revisada. Al emprender la revisión de esta teoría, Chargaff esperaba

encontrar a cada uno de los cuatro nucleótidos presente en cantidades variables, y no en la misma cantidad como predecía la teoría del tetranucleótido. Más aún, si el ADN era el responsable de la especificidad biológica, habría de esperar que el ADN de especies distintas fuera distinto en la cantidad de los nucleótidos que lo componen, esto es, que hubiera notables diferencias en la cantidad de cada uno de los nucleótidos del ADN de las diferentes especies vivientes. Al emprender la revisión de la teoría de Levene y hallar elementos para su derrocamiento, Chargaff estaba realizando una actividad revolucionaria en favor del nuevo paradigma del ADN como sustancia genética. Su labor a este respecto contribuiría además con las proporciones uno a uno entre las purinas y pirimidinas, las cuales habrían de ser una clave fundamental en el modelo de la doble hélice de Watson y Crick. Las posturas encontradas de Chargaff y Hershey, o Chargaff y Salvador Luria, delatan, pues, un período de ciencia extraordinaria en la biología molecular, un período que habría de consumirse con el modelo de Watson y Crick. Esto es, con el modelo de la doble hélice, la revolución en la biología molecular se resolvía a favor del paradigma del ADN como sustancia genética.

EL MODELO DE LA DOBLE HELICE Y LA CULMINACION DE UNA REVOLUCION

Si los trabajos de Avery, con sus resultados que indicaban al ADN como sustancia genética y que darán origen a una crisis, representan el comienzo de un nuevo camino por el que habría de conducirse la biología molecular; el modelo de la doble hélice de Watson y Crick para la estructura del ADN representa el toque final mediante el cual queda establecido ese nuevo camino en el andar o el quehacer científico de los biólogos moleculares, esto es, da paso a una nueva manera de practicar biología molecular. El modelo de la doble hélice representa, desde esta perspectiva, la culminación de una revolución científica iniciada en el trabajo de Avery sobre transformación bacteriana. En otros términos, conforme a lo señalado en la última sección del primer capítulo, es el momento en el que la mayoría de la comunidad de los biólogos moleculares se convierte al paradigma del ADN como sustancia genética, en el que lo adoptan como rector del trabajo en biología molecular.

La idea fundamental que condujo hacia la proteína como sustancia genética fue la de una "sustancia altamente compleja" (véase sección 2 del segundo capítulo). Frente a la proteína, el ADN aparecía como una sustancia sencilla, con tan sólo cuatro componentes en su estructura. A esta simplicidad de componentes se debe el que se le haya desdeñado como sustancia genética. Es por ello que, en gran parte, el trabajo revolucionario que habría de colocar al ADN como sustancia genética estaría encaminado a fortalecer su imagen como sustancia compleja. En la revolución de la biología molecular, pues, uno de los temas o términos claves que ayudó a dirimir la disputa entre quienes

apoyaban al viejo paradigma de la proteína como sustancia genética y el nuevo paradigma del ADN como sustancia genética fue el de complejidad molecular. Fue este un término que hizo posible la comunicación entre dos visiones inmensurables acerca del ADN: la del viejo paradigma que lo veía, frente a la proteína, como una sustancia sencilla y la del nuevo paradigma que lo ve como una sustancia igualmente compleja como la proteína. Para cada una de las posturas había un significado diferente bajo el término ADN. Gracias al término de complejidad molecular, que de igual manera lo entendían los partidarios del viejo y nuevo paradigma, fue posible la comunicación entre unos y otros. Sobre todo para los partidarios del nuevo paradigma fue un término decisivo en sus esfuerzos por hacer ver, a sus oponentes, al ADN como sustancia genética. De ahí que la labor científica de quienes a partir del trabajo de Avery vieron en el ADN la sustancia transformadora, fue la de hallar sustentos que apoyaran la complejidad molecular en el ADN. Es en este preciso sentido en el que Chargaff, al revizar la teoría del tetranucleótido de Levene, realizó su trabajo sobre las especificidades nucleótidas de los ADNs de diferentes especies. Al echar abajo la teoría del tetranucleótido, Chargaff estaba preparando el camino que conduciría a lo que sería la consolidación de la nueva imagen del ADN, al modelo de Watson y Crick para la estructura del ADN.

Si bien para entonces Erwing Chargaff era un científico reconocido; ello no impidió que se sumara a la nueva visión que se estaba forjando, en el trabajo de Avery, del ADN. Sin embargo, la consolidación de esa nueva imagen sería llevada a cabo, conforme a lo que establece Kuhn en su teoría del cambio científico, por los menos comprometidos al viejo paradigma. Tanto en el caso James Watson como el de Francis Crick, la pronta aceptación de los resultados de Avery sobre transformación bacteriana se debe al ligero compromiso que

tenían hacia el paradigma de la proteína como sustancia genética. A siete años de que Avery diera a conocer su trabajo, Watson y Crick se dieron a la tarea de averiguar la estructura del ADN. Ello a tan sólo un año de que Watson concluyera su tesis doctoral y tres de que Crick abrazara el campo de la biología después de abandonar el de la física. Tanto para Watson como para Crick el campo de la biología molecular, en 1951, era un campo al que se estaban incorporando, sin tener para entonces fuertes compromisos que los vinculara al paradigma establecido. Es más, antes de que formaran mancuerna, Watson y Crick, al igual que Chargaff, se sentirían atraídos hacia el ADN por influencia de Avery. Su ligero compromiso al viejo paradigma fue lo que hizo que este dúo de Cambrige se abocara al estudio de la estructura del ADN antes de que se declarara a esta sustancia como material genético.

Antes de que Watson y Crick se aventuraran a establecer la estructura del ADN, se había intentado una y otra vez establecer la identidad de la sustancia genética mediante su aislamiento, esto es, separando las sustancias nucleoproteínicas entre sí, a fin de observar en cuál de ellas estaba presente la función genética. Aunque este era un medio que había estado fracasando, era un recurso al que no habían querido renunciar tan fácilmente quienes se afanaban por identificar la sustancia genética, aun cuando contaban con otros medios. Para entonces la biología molecular contaba con el recurso que le ofrecía la química: determinar la estructura molecular de las sustancias a fin de explicar el comportamiento de las mismas. En este sentido, la biología molecular estaba en posibilidad de determinar cuál de las dos sustancias nucleoproteínicas presentaba la función genética recurriendo a la estructura de cada una de las sustancias involucradas. Aquella estructura que presentara rasgos que explicaran la función genética se podría tomar como la sustancia genética. A pesar de lo decisivo que podría llegar a ser este

recurso, nadie, antes de Watson y Crick, lo tomó en serio en el estudio del ADN. Todo parece indicar que el desdén que se tenía por el ADN, la visión de que era una sustancia insignificante frente a la proteína, fue el principal factor que retardó la aplicación de este recurso a la solución del problema de la identidad de la sustancia genética. Sólo científicos como Watson y Crick, recién ingresados al campo de la biología molecular y que aceptaban la visión del ADN que sugería el trabajo de Avery, estaban en condiciones de investigar lo que otros desdeñaban por su fuerte compromiso al paradigma prevaliente. Esta polaridad de visiones que había entre el dúo de Cambridge y otros miembros de la comunidad de los biólogos moleculares la percibe Watson en Crick al señalar que "éste manifestaba un claro desprecio por aquellos científicos pedantes de los que no tenía nada que aprender. Y no sólo los tomaba por obtusos y de mentalidad estrecha, sino por unos estúpidos que no aceptaban por concluyentes pruebas que él consideraba concluyentes a favor del ADN" (Watson, La doble hélice, págs. 29-30). Al tomar esta postura e investigar la estructura de la sustancia que veían como la sustancia genética, Watson y Crick estarían llevando a su etapa culminante el proceso revolucionario iniciado con el trabajo de Avery.

Aunque el modelo de la doble hélice de Watson y Crick pudo haber sido un trabajo más de entre todos aquellos que se hicieron con el fin de apoyar la nueva visión del ADN, fue el argumento que, después de otros tantos ofrecidos al mismo respecto, terminó por convencer a las mentes más recalcitrantes de la comunidad biológica del papel genético que se le venía atribuyendo a esta sustancia desde Avery. Y es que el modelo de la doble hélice pudo demostrar que una macromolécula de tan solo cuatro componentes podía ser tan diversificante como la proteína y, por lo tanto, ser el almacén donde guarda la información genética que determina la especificidad biológica de cada una

de las especies vivientes o, dicho en términos del Olby, "demostró que una estructura tan regular como el ADN podía acomodar dentro de sí una secuencia no repetitiva de las cuatro bases. Todas las permutaciones concebibles de secuencias eran posibles en una sola hebra polinucleótida, por lo que el ADN podía contener un código genético adecuado para explicar la gran variabilidad de heliografías que se dan en la naturaleza, siempre que la molécula de ADN fuera lo suficientemente grande" (Olby, El camino hacia la doble hélice, pág. 598).

Aunque el modelo de la doble hélice mostraba que el ADN podía ser tan complejo como la proteína, éste no sería sino un aspecto más de un conjunto de aspectos que determinaría la capacidad persuasiva de este argumento a favor del ADN. Pero si, en todo caso, se pudiera destacar algún aspecto de este modelo que haya tenido un peso definitivo sobre el proceso revolucionario en la biología molecular, esto es, un aspecto que terminaría por convencer o convertir a la mayoría de la comunidad científica de esta disciplina al nuevo paradigma, tendría que ser su capacidad para explicar la función reproductiva que manifiesta la sustancia genética. El modelo de la doble hélice, al establecer que el ADN se compone de dos cadenas polinucleótidas complementarias y de que cada una, al separarse durante la mitosis, sirve como plantilla o matriz que sintetiza a una cadena idéntica a aquella de la que se separó, explicaba de manera elegante la reproducción genética observada en bacteriofagos. A este respecto, Salvador Luria, quién se había resistido a tomar al ADN por sustancia genética, reconoce, en los siguientes términos, el influjo que tuvo el modelo de la doble hélice en su cambio de visión acerca del ADN: "Nosotros supimos que el genoma del fago era replicado por un proceso logarítmico antes de que conociéramos de qué estaba hecho. A pesar del hecho claramente reconocido de que la multiplicación del

fago ocurría por la replicación de componentes subvirales seguida por el ensamblaje y la maduración, toda la evidencia biológica insistió hasta el último momento, en dirigir nuestra atención hacia un proceso de replicación del tipo de fisión más que a uno de tipo de matriz. Sólo con el modelo Watson-Crick (1953), la antinomia fisión-matriz fue dialécticamente resuelta" (Vid "Antología de biología molecular" de Mario Castañeda, Lecturas universitarias, ed. U.N.A.M., México 1985, pág. 91). El papel revolucionario que tuvo el modelo de la doble hélice al definir la estructura del ADN y demoler, con ello, la resistencia a aceptar la nueva imagen del ADN que se dió después de la aparición del trabajo de Avery, Maurice Wilkins la expresa en las siguientes palabras: "Entre 1946 y 1950 muchas líneas de evidencia indicaron que la sustancia genética era ADN, y no proteína o nucleoproteína. Los prospectos de elucidar la función genética en términos de estructura molecular fueron grandemente mejorados cuando se supo que el ADN tenía una estructura definida" (Vid, Mario Castañeda Op. cit. pág. 142).

Pero si fuera poco, el modelo de la doble hélice no sólo presentó elegancia en cuanto argumento a favor del nuevo paradigma, sino además presentó otro valor de los que Kuhn señala como decisivos en la persuasión que ejerce un argumento a favor de alguno de los paradigmas en disputa, en este caso, a favor del paradigma del ADN como sustancia genética, nos referimos al "valor de la predicción" (Ofr, kuhn, Tensión esencial, págs. 236-237). Si el ADN era una macromolécula de doble cadena, en el que cada cadena sintetiza su cadena complementaria, es de esperar que el ADN se reproduzca a través de la duplicación y que, de este modo, cada una de las dos macromoléculas hijas contenga a una de las dos cadenas de la macromolécula madre. El experimento que comprobaría esta predicción fue realizado en el año de 1958, bajo los siguientes pasos:

1) La cultivación de bacterias en un medio que contenía gran cantidad de una variedad pesada de átomos de nitrógeno, nitrógeno 15, en lugar del nitrógeno 14 que es el que corrientemente poseen las cadenas de ADN.

2) Después de reproducidas las bacterias durante varias generaciones en este medio, se lograba que el ADN de éstas estuviera constituido por dos cadenas que poseían nitrógeno 15; razón por la cual se le denominaba ADN 15-15.

3) A las bacterias con ADN 15-15 se les reprodujo durante dos generaciones en un medio con nitrógeno 14. En la primera generación se obtuvieron bacterias con ADNs 15-14, es decir, cada cadena con nitrógeno 15 sintetizó su cadena complementaria con nitrógeno 14. Ahora bien, como la segunda generación tendría por madres ADNs 15-14, serían, tal y como sucedió, bacterias con ADNs 15-14 y 14-14, en una proporción de uno a uno.

Con estos resultados se comprobaba una de las predicciones del modelo de la doble hélice, modelo por el cual la imagen del ADN como sustancia genética apareció de una manera más clara o convincente a la vista de aquellos que se resistieron por casi nueve años a ver de esta forma al ADN. Las virtudes persuasivas del modelo de la doble hélice a favor de la nueva imagen del ADN fueron decisiva en la culminación de una revolución que haría de la biología molecular una ciencia experimental, pues por primera vez se contaba con la presencia física del gene, sobre la cual se podría experimentar. Con el modelo de la doble hélice el gene dejaba de ser una idea metafísica para pasar a ser una entidad física a la que se le identificaba como ADN.

COMO CONCLUSION

Por un buen tiempo se pensó que el desarrollo de la ciencia respondía a un fin transcendental, que estaba más allá de los intereses personales del científico, de las instituciones que financian esta actividad o de las idiosincrasias de las comunidades a las que pertenece el hombre de ciencia. En este sentido, el avance de la ciencia se consideraba como un constante aproximarse de la ciencia a la meta: Cada nuevo conocimiento, aunado a los ya logrados -según esta forma de entender las cosas- coloca a la ciencia en una posición cada vez más cercana a su objetivo, el conocimiento de la verdad total o absoluta.

En su obra " la estructura de las revoluciones científicas", Tomás Kuhn desarrolla una teoría del cambio científico que, si bien no del todo renuncia a la idea de que la ciencia progresa acumulando conocimientos, no considera que ésta sea la única forma de cambio presente en la actividad científica. Además de un proceso acumulativo de conocimiento -en el que consiste esencialmente la ciencia normal-, para Kuhn se da un proceso de cambio que se manifiesta de vez en cuando en la ciencia, al que llama "revolución científica".

A diferencia del proceso normal de acumulación de conocimiento, la revolución científica es un proceso en el que los conocimientos logrados durante un periodo de ciencia normal -y que constituyen una forma específica de ver el mundo- son sustituidos, aunque quizá no definitivamente, por otros conocimientos. De este modo, aquella vieja visión de que la ciencia se

dirige, a través del camino establecido del método científico, hacia la verdad absoluta o total se ve seriamente criticada. Por un lado, si el conocimiento no es algo definitivo, aquello de lo que deriva corre la misma suerte, esto es, los principios últimos en los que se basa el trabajo científico y por los que se fundamenta el conocimiento en cada una de las ciencias son puestos en tela de juicio. La ciencia, desde la perspectiva de Kuhn, no cuenta con un camino o método fijo e infalible que garantice la permanencia de sus teorías o conocimientos, sino que, a lo largo de su historia, cuenta con una serie de paradigmas que determinan, uno en cada determinado episodio de su historia, la manera de hacer ciencia. Y, por otro lado, si cada uno de los pedacitos de conocimiento no es por sí mismo sólido, no es capaz de soportar el peso de los que sobre él se apoyen. Esto es, si cada uno de los conocimientos o verdades que, como partes, constituyen a la verdad total no pueden garantizar su permanencia en la ciencia, entonces esa verdad total jamás podrá constituirse o, lo que es lo mismo, jamás podrá ser. Más que una realidad, la verdad total y absoluta es una ficción de los clásicos filósofos de la ciencia a los que Kuhn objeta con su modelo. Para Kuhn, la ciencia no responde a un fin trascendental como la verdad total y absoluta, sino que se encuentra motivada por el paradigma como su vector fundamental, esto es, es el paradigma el que anima y provee de sentido o rumbo al trabajo científico. Bajo esta condición, el paradigma, para Kuhn, determina lo que cuenta como problema y solución o explicación del mismo.

Dado que una revolución científica es la sustitución de un paradigma por otro, en Kuhn la noción de paradigma se vuelve el eje de la explicación de ésta. Sólo comprendiendo lo que es el paradigma es posible comprender los procesos revolucionarios que se suscitan en las diversas ciencias. De ahí que una parte de su "Estructura de las revoluciones científicas" esté dedicado a

exponer esta noción y, dada la tergiversación que sufrió en manos de sus críticos, una parte considerable de su "Posdata de 1969" a aclarar las confusiones que ésta había suscitado.

Para Kuhn el paradigma, según lo que se vio en el primer capítulo, es una parte esencial y compleja de la ciencia. De todos los aspectos que constituyen al paradigma hay dos que son fundamentales en la explicación de las revoluciones científicas: 1) La concreta solución de problemas y 2) la forma de ver. Por lo que respecta a la concreta solución de problemas, ésta es una manera establecida de solucionar problemas, esto es, una manera que ha llegado a ser y es la forma de solucionar problemas en la ciencia. Desde esta perspectiva, más que por otros de sus aspectos, es por la concreta solución de problemas que el paradigma determina la manera de hacer ciencia. En cuanto a la forma de ver, ésta se refiere tanto a las imágenes perceptuales como conceptuales que el científico crea según su educación. Es decir, lo que el científico ve y entiende es lo que su educación le hace ver y entender. De este modo, lo que el científico ve a través de los ojos del cuerpo y entiende a través de los ojos de la razón no es lo dado, sino lo creado, lo que el paradigma determina. El paradigma, en cuanto forma de ver, es una manera específica de procesar el estímulo y crear determinadas imágenes, ya sea perceptuales o conceptuales.

La revolución científica no es un acontecimiento que suceda en un solo momento, sino que se trata de un proceso que se desarrolla a lo largo de un determinado lapso de tiempo, según sean las resistencias que haya a abandonar el viejo paradigma. La revolución es un proceso en el que gradualmente se sustituye a un viejo paradigma por uno nuevo. Dado que durante la revolución científica un viejo paradigma va perdiendo gradualmente terreno frente a un nuevo paradigma que lo va ganando, en el proceso revolucionario se distinguen

diversas etapas en las que la correlación de fuerzas entre los paradigmas adquiere un estado específico. Para Kuhn, según lo visto en el primer capítulo, la revolución científica se constituye de una etapa inicial, una intermedia y una final. La etapa inicial, en la que da comienzo la revolución, se caracteriza en que el viejo paradigma deja de operar dentro de la ciencia, es decir, el paradigma, como concreta solución de problemas, se muestra incapaz de solucionar una anomalía. El desconcierto o perplejidad que provoca, en el científico, el reconocimiento de que su herramienta fundamental en su labor científica ha dejado de servir u operar, hace que Kuhn llame a esta etapa inicial de la revolución como crisis. Esta etapa concluye cuando uno o varios miembros de la comunidad científica encuentran una solución a la anomalía que mostró la falibilidad del viejo paradigma en la solución de problemas. Durante esta etapa, quiénes han encontrado la solución a la anomalía trabajan por consolidar su solución, no sólo mejorándola, sino además difundiendo sus bondades. Es por el trabajo que se realiza a favor de esta solución, frente a la incapacidad del viejo modelo de solucionar problemas para resolver una anomalía, que a esta etapa Kuhn le nombra como ciencia extraordinaria. En esta etapa tenemos una manera de hacer ciencia que unos cuantos practican, determinada por la solución a la anomalía, que reclama sea tomada ante la incapacidad del viejo modelo para solucionar la misma anomalía, esto es, ante un manera de hacer ciencia que ha cesado pero que la mayoría de una comunidad científica espera vuelva operar. Es decir, en el escenario de la ciencia extraordinaria, se encuentra, por un lado, el viejo paradigma que ha perdido su concreta solución de problemas pero que aún cuenta, en su forma de ver, con el respaldo de la mayoría de la comunidad científica y, por otro lado, se encuentra el nuevo paradigma con su concreta solución a la anomalía que suscitó la crisis pero que carece, en su

forma de ver, del respaldo de esa misma mayoría. En este sentido, para Kuhn, durante la etapa de ciencia revolucionaria, se da una labor tendiente a debilitar la forma de ver del viejo paradigma, a fin de restarle adeptos a éste. De ahí que para Kuhn sea importante restablecer la comunicación entre los que sustentan paradigmas oponentes o ven y entienden el mundo de una manera diferente. Sólo a través de la comunicación es posible que, entre quienes sustentan paradigmas diferentes, unos vean y entiendan lo que los otros ven y entienden, y viceversa. Ello significa que unos y otros deben ponerse en condiciones de ver el mundo como el otro lo ve. Sólo así es posible que se comprenda al oponente. El punto aquí es que al ver el mundo como lo ve el otro y comprenderlo, se está, de momento, dejando la propia forma de ver el mundo para adoptar la del otro. Los éxitos que acumula la nueva solución y la recurrente adopción de la forma de ver el mundo que se relaciona con dicha solución provoca que los adeptos del viejo paradigma se convencen o persuadan de las bondades del nuevo paradigma. Esta es la condición que prepara y da paso a la tercera etapa de la revolución científica, la cual, por ser la etapa en la que se da la sustitución del viejo paradigma por el nuevo, Kuhn llama, con propiedad, como la de la revolución científica. Es la etapa en la que la mayoría de los miembros de una comunidad científica se convierte al nuevo paradigma, esto es, una vez que éstos se persuaden de las bondades del nuevo paradigma, adoptan la nueva forma de hacer ciencia. En la etapa culminante de la revolución científica, la mayoría de la comunidad científica ha tomado la concreta solución de problemas del nuevo paradigma como rector o guía de su labor científica en la misma medida que ha ido adoptado la forma de ver el mundo que se vincula a dicha concreta solución.

Aunque este modelo de cambio científico de Kuhn quizá no sea del todo completo y deje, por ende, muchos casos de cambio científico sin explicar, por lo menos en lo que se refiere al caso del descubrimiento de la estructura del ADN sale exitoso. La reconstrucción histórica de este evento, bajo el marco teórico kuhniano, nos ha permitido comprender que las resistencias a tomar los resultados del trabajo de Avery más que responder a una exigencia científica de reunir mas elementos que sustenten un nuevo hallazgo, responden a una forma de ver y entender el mundo que tiene la mayoría de una comunidad científica en un momento determinado, forma de ver para la cual todo hallazgo imprevisto lo único que tiene en claro es su adversidad hacia las creencias con las que, dicha comunidad, ha comulgado hasta el momento. Como hallazgo imprevisto, los resultados del trabajo de Avery ponían en tela de juicio al viejo paradigma de la proteína como sustancia genética.

Desde que se viera la posibilidad -con el desarrollo de la teoría macromolecular- de encontrar, en alguna de las sustancias dadas en el campo de investigación de la química orgánica, al gene, se erigió la fuerte creencia a considerar al material genético como una sustancia altamente compleja. A juzgar por los complejos fenómenos que manifestaba el gene, como son los de la reproducción de la especificidad biológica de las especies y la diversidad de las mismas, se tomaría a la proteína como sustancia genética. De todas la sustancias orgánicas conocidas, las proteínas, por su naturaleza macromolecular y por los veintidos aminoácidos que pueden constituirla, son las que presentan una mayor diversidad. Esta capacidad diversificante de las proteínas fue lo que sustentó la creencia de que esta sustancia era la sustancia genética. Esta forma de ver o entender la sustancia genética constituyó al paradigma de la proteína como sustancia genética. Durante el tiempo que esta creencia permaneció incuestionable, los trabajos en biología

molecular estaban directamente enfocados a confirmar la naturaleza proteínica del material genético. El propio Avery estaba convencido de ubicar, en sus experimentos, como proteína a la sustancia genética. Si bien los ojos del biólogo molecular estaban volcados hacia la proteína, el ADN, en cambio, apenas era una sustancia conocida. De no ser por el interés que le mostró Levene, el ADN hubiera sido una sustancia prácticamente desconocida. Esta situación muestra que, además de una forma de ver, el paradigma de la proteína como sustancia genética determinó una manera de hacer ciencia dentro de la biología molecular, una manera en la que se diseñaban y ejecutaban experimentos con el afán de encontrar en la proteína la sustancia genética. Sobre la solución que ofrecía el paradigma de la proteína como sustancia al problema de la identidad de la sustancia genética, que consiste fundamentalmente en señalar a la proteína como sustancia genética, se realizó el trabajo científico que se caracterizaría como un afán por confirmar la naturaleza proteínica de la sustancia genética. La anterior afirmación de ninguna manera debe tomarse como contradictoria si comprendemos que la íntima relación entre la forma de ver y la concreta solución de problemas, que en ocasiones puede conducir a confundir a una con la otra, no es otra cosa más que el hecho de que el científico trabaja y procede en el mundo que investiga en consonancia con lo que en él ve y cree.

El ver en la proteína la sustancia genética y trabajar a fin de corroborar esta imagen son dos aspectos del paradigma que había de ser sustituido por el paradigma del ADN como sustancia genética, a través de un proceso que reúne características de una revolución científica o, mejor aún, de una microrevolución científica -es decir, una revolución que, en este caso, sólo transformó a la biología molecular-. Al menos en este proceso

distinguimos las tres etapas por las que atraviesa una revolución científica:

En primer lugar, los inesperados resultados del trabajo de Avery en 1944 condujeron a la biología molecular hacia una crisis. La identificación de la sustancia transformadora como ADN fue una anomalía que desconcertaría al propio Avery. Si bien en el caso de los trabajos de inactivación vírica por medio de radiación ultravioleta fue posible resolver el problema que representaba el hecho de que, durante el proceso de duplicación del virus, el ADN mostrara una mayor actividad y absorción de rayos ultravioleta mediante la teoría de la transferencia de energía (Vid, op. cit. págs. 249-252); en el caso de los resultados del trabajo de Avery, éstos representarían una anomalía que induciría al reducido grupo de investigadores que se afanaban por identificar al material genético a abandonar la solución que señalaba a la proteína como sustancia genética, por lo cual, desde entonces, se habrían de considerar otras alternativas. La naturaleza misma del problema de la identidad de la sustancia genética, que ubicaba en alguna de las dos sustancias nucleoproteínicas al material, puso a consideración del biólogo molecular dos alternativas, una de las cuales, sin restarle importancia a la proteína, le concedía al ADN un papel secundario en las funciones genéticas. Para esta solución, el ADN era simplemente una sustancia matrona (o partera) que se encarga de traer a este mundo lo que la proteína ha procreado. Es decir, aunque el ADN no determina la especificidad biológica la hace posible. La otra solución es la que señala al ADN como sustancia genética. El que no hubiera más que estas dos alternativas hizo de la crisis suscitada por los resultados del trabajo una crisis breve y, por ello, poco traumática al biólogo molecular.

La pronta superación de la crisis, daría pasó a una etapa de ciencia extraordinaria, en la que no tan sólo se discutirían las bases metodológicas (o epistemológicas) del experimento de Avery, sino que además se realizaría una labor científica tendiente a desarrollar la solución de que era el ADN la sustancia genética. A esta etapa corresponden los trabajos de Erwing Chargaff, quién se encargaría, por un lado, de destruir el obstáculo que impedía ver al ADN como sustancia genética, es decir, la teoría del tetranucleotido de Levene; y, por otro lado, con su descubrimiento de las proporciones uno a uno entre purinas y pirimidinas, establecería una correspondencia entre la especificidad biológica de las especies y la composición nucleotida del ADN de las especies, es decir, que a cada especie le corresponde un ADN específico.

Pero, además, se trata de un periodo de ciencia extraordinaria porque en él el viejo paradigma ha perdido el terreno que el nuevo paradigma ha ganado. Es decir, por un lado tenemos un paradigma que conserva su forma de ver pero que ha perdido su original concreta solución al problema de la identidad de la sustancia genética, y, por otro lado, un paradigma que cuenta con una solución al mismo problema pero cuya forma de ver aún no cuenta con el respaldo de la mayoría de los biólogos moleculares. La obstinación por mantener la visión de ver a la proteína como la sustancia genética conduciría a los partidarios de este paradigma a ocultar la inoperatividad de su solución. Para ellos, lo que los experimentos como el de Avery mostraban era el papel secundario del ADN en las funciones genéticas, los cuales, a pesar de todo, no habían sido capaces de revelar el papel primario de la proteína. La solución que le concede un papel secundario al ADN, más que reconocer una participación del ADN en la funciones genéticas, oculta las deficiencias de la vieja solución para explicar los resultados adversos del experimento de

Avery y oculta, con ello, su debilidad que la hace insostenible como solución. Mas que una alternativa, la solución que considera a la sustancia nucleoproteínica como sustancia genética obedece a un afán por volver a la vida o hacer nuevamente operativa una solución que ha dejado de operar. En esta etapa, tenemos, pues, un paradigma que se resiste a ser sustituido por un paradigma que se esfuerza, con sus logros, por sustituirlo.

Si bien los trabajos de Erwing Chargaff y Hershey se realizaron dentro de una etapa de ciencia extraordinaria en el proceso de cambio de la biología molecular y respaldarían al nuevo paradigma del ADN como sustancia genética, no fueron lo suficientemente persuasivos como para convertir a la mayoría de la comunidad científica de los biólogos moleculares a la nueva manera de hacer biología molecular. Es decir, no fueron lo suficientemente efectivos como para hacer que los que veían en la proteína al material genético vieran, en su lugar, el ADN y, al mismo tiempo, tomarán la solución que dicha visión conllevaba. La etapa culminante del proceso revolucionario suscitado por la anomalía que hace presente el trabajo de Avery le corresponde al modelo de la doble hélice de Watson y Crick. Al abordar el problema de la identidad del material genético desde la perspectiva que, más que ninguna otra, le corresponde a la biología, el modelo de la doble hélice ponía en claro, al dilucidar la estructura del ADN, que las funciones genéticas le correspondían a esta sustancia. En el modelo de la doble hélice se encontraría el argumento más convincente a favor de la imagen que habían estado delatando experimentos como los de Avery y a la cual permanecían ciegos los partidarios del viejo paradigma, es decir, era fácil ver en él al ADN como una sustancia portadora de las funciones genéticas: En sus dos hélices complementarias se veía la capacidad del ADN para reproducirse y en su secuencia de nucleótidos la especificidad biológica de cada especie. La elegancia con la que el modelo de

la doble hélice explicaba la reproducción de la especificidad biológica fue tan convincente que induciría a la mayoría de los biólogos moleculares a convertirse al nuevo paradigma, esto es, a practicar su ciencia bajo las riendas de la nueva solución. En este sentido, el modelo de la doble hélice representa, en la historia de la biología molecular, una revolución científica.

A juzgar por lo expuesto, consideramos que el modelo kuhneano es un modelo que puede ser utilizado, sin mayores dificultades, en la reconstrucción histórica del descubrimiento de la estructura del ADN que hicimos en el capítulo dos de este trabajo. De acuerdo a lo ahí expuesto, el modelo de la doble hélice forma parte de una serie de trabajos encaminados a establecer la identidad del gene. Ante la dificultad que representó identificar por medios físicos a alguna de las dos sustancias nucleoproteínicas como gene (que consistían fundamentalmente en separar a la proteína del ADN, a fin de observar el comportamiento que muestra cada una por sí sola), se plantearía la necesidad de adoptar un enfoque que había sido ignorado hasta entonces, un enfoque químico que considera a la estructura de cada sustancia como su carácter esencial. En la estructura era posible encontrar la función que caracteriza de manera específica a cada sustancia. Gracias a este enfoque, realizado en el modelo de la doble hélice, se haría posible superar una idea que había estado dominando las mentes de quienes se afanaban por traer del plano metafísico hacia el plano físico al gene (es decir, ubicar una sustancia real que poseyera las características presentes en la mera idea del gene), la idea en la que se consideraba a la proteína como la sustancia genética. Con el modelo de la doble hélice fue posible aceptar lo que los experimentos de Avery, en 1944, habían estado mostrando, que el ADN era la sustancia responsable de las funciones genéticas.

Este proceso por el cual gradualmente se va abandonado la idea de que la proteína es la sustancia genética y se acepta el hecho que innumerables experimentos delataban y que el modelo de la doble hélice denuncia con mayor evidencia es una revolución científica que solo afectaría a la biología molecular, es decir, se trata de una microrevolución. Ni la física ni la química, que son las ciencias auxiliares de la biología molecular, saldrían afectadas por el descubrimiento de la estructura del ADN. Por ejemplo, cualquiera que fuera la identidad de la sustancia genética, los principios físicos y químicos que describen las fuerzas de enlace entre los átomos que constituyen una molécula o macromoléculas seguirían siendo los mismos. Más aún, la prontitud con la que Francis Crick derivó su teoría de la difracción helicoidal (que fue un instrumento fundamental en la determinación de la estructura del ADN) de la teoría de la difracción de Fresnel, por un lado, y, por otro, la pericia con la que se manejaron los principios estereoquímicos durante el desarrollo del modelo de la doble hélice, nos deja en claro que dicho modelo jamás puso en riesgo a la física y a la química. Por el contrario, frenó las esperanzas de Niels Bohr de encontrar nuevas leyes para la física en la biología, es decir, que "fenómenos biológicos como el de la reproducción delataran leyes físicas desconocidas" (Vid, Olby op. cit., págs. 331-340). El proceso por el cual se sustituye la idea de la proteína como sustancia genética por la teoría que considera al ADN como la materia de la que están hechos los genes se puede reconstruir como una microrevolución científica, con lo cual el modelo Kuhniano de cambio científico sale exitoso por lo menos para este caso.

BIBLIOGRAFIA

AYALA F., Genética moderna, ed. Fondo Educativo Interamericano, Barcelona 1984

BRAGG W., Los rayos Rontgen, en Sigma, el mundo de la matemáticas, ed. Grijalbo, Barcelona 1985

CASTAREDA MARIO, Antología de biología molecular, ed. Dirección General de Publicaciones (UNAM), México 1985

CRICK FRANCIS, Que loco propósito, ed. Tusquets editores, Barcelona 1989

KUHN TOMAS, La estructura de las revoluciones científicas, ed. Fondo de Cultura Económica, México 1995

KUHN TOMAS, La tensión esencial, ed. Fondo de Cultura Económica, México 1996

LAGUNA JOSE, Bioquímica, ed. Prensa Médica Mexicana, México 1971

LAKATOS Y MUSGRAVE, La crítica y el desarrollo del conocimiento, ed. Grijalbo, Barcelona 1975

LLERA DOMINGUEZ E., Temas para un futuro biólogo, ed. Dirección General de Publicaciones (UNAM), México 1984

MORRISON Y BOYD, Química orgánica, ed. Fondo Educativo interamericano, México 1985.

OLBY ROBERT, El camino hacia la doble hélice, ed. Alianza, Madrid 1991

PEREZ RANSANZ A.R. Kuhn y el cambio científico, ed. Fondo de Cultura Económica, México 1999

RESNICK ROBERT, Física, Vol. II, ed. CECSA, México 1985

WATSON JAMES, La doble hélice, ed. Plaza and Janes, Barcelona
1978

YUDKIN MICHAEL, Biogímica, ed. Ediciones Omega S.A., Barcelona
1976.