

# Prólogo

*Una de las inquietudes del doctor Arturo Rosenblueth fue la de tratar de sistematizar los conocimientos sobre método científico. Prueba de ello es que en los años de 1949 y 1950, y posteriormente en 1961, impartió cursos sobre este tema en El Colegio Nacional, del cual fue miembro desde 1947. Algunos aspectos de este estudio han sido publicados, comenzando con el tantas veces citado Behavior, purpose and teleology, con N. Wiener y J. Bigelow en 1943; luego: The role of models in science, en 1945 con N. Wiener; La invención científica, en 1956, y La estética de la ciencia, en 1957.*

*Con ayuda de las numerosas notas preparadas para sus conferencias, con el recuerdo de la presentación de sus pláticas, y con la impresión profunda dejada por el contacto con el doctor Rosenblueth durante muchos años de trabajar juntos, gozando de su conversación siempre ágil y amena, sus ideas sobre estos tópicos han sido reunidas en los once apartados y un Apéndice que forman este libro. Con el propósito de no dejar trunco el curso de la presentación del tópico, y de mantener la unidad del tema, gran parte del material, previamente publicado se repite aquí. Así, el capítulo 9 contiene mucho de The role of models in science; el capítulo 10 trata de lo expuesto en La invención científica, y el 11 se refiere a La estética de la ciencia. Estos capítulos no son, sin embargo, la reproducción exacta de estas publicaciones. En ellos me he apegado más a las notas de las conferencias, tendiendo a conservar el estilo casual y menos formal que en éstas se empleaba.*

## 2 Prólogo

*De la misma manera, en otros capítulos podrán encontrarse aspectos de su pensamiento ya conocidos, los que recientemente aparecieron en su libro Mind and Brain: A philosophy of science, que fue publicado por la M.I.T. Press, simultáneamente con la versión española, hecha por él mismo, y publicada por la Editorial Siglo XXI, México.*

*Debo reconocer que en mi tarea pude contar con la valiosa ayuda y estímulo de la señora doña Virginia T. Vda. de Rosenblueth, quien puso a mi disposición el material necesario y colaboró en la corrección del manuscrito.*

J. GARCÍA RAMOS

MEXICO, MCMLXXI.

# *Contenido*

- 1. Prólogo
- 4. ¿Qué es la ciencia?
- 19 La observación y la experimentación
- 27. Las matemáticas y la ciencia
- 34 El criterio del operacionalismo. Propositiones cognitivas y no-cognitivas
- 41 Postulados y axiomas
- 48 La lógica en la ciencia. Inducción, deducción
- 57 El principio de causalidad. La teleología
- 66 Explicaciones, hipótesis, leyes
- 70 Los modelos científicos
- 76. Los aspectos no-lógicos de la ciencia
- 83. Los aspectos estéticos de la ciencia
- 90 Apéndice. La comunicación de los resultados de un estudio científico

# *¿Qué es la ciencia?*

## *Introducción*

Aun cuando parezca paradójico, la mayoría de las personas que se dedican a la investigación científica y que contribuyen al desarrollo y progreso de la disciplina que cultivan, no podrían formular con precisión su concepto de lo que es la ciencia, ni fijar los propósitos que persiguen, ni detallar los métodos que emplean en sus estudios, ni justificar estos métodos. Probablemente la mejor respuesta obtenible es que la ciencia es el tema del cual tratan los libros y revistas científicas, y que el método científico es el que siguen los hombres de ciencia en sus laboratorios o gabinetes, cuando se dedican a la investigación científica.

Esto se debe, a que la mayoría de los hombres de ciencia se han encauzado en su disciplina, iniciándose como aprendices junto a un maestro. Como jóvenes estudiantes, leyeron algunos tratados científicos y escucharon cierto número de conferencias sobre algún tema. El concepto general e impreciso que se formó en su mente despertó su interés. Cuando se presentaron ante el hombre de ciencia que dirigía un laboratorio o departamento, y manifestaron su deseo de dedicarse a dicha disciplina científica no preguntaron, ni se les dijo, cuál era la meta final de sus labores. El maestro no les señaló los motivos, probablemente oscuros para él mismo, que le condujeron a seleccionar el problema que les asignó. Si la capacidad del estudiante y su intuición fueron apropiadas, este primer paso, en el

maravilloso y siempre nuevo mundo de la investigación científica, les sugirió posteriormente nuevas excursiones cada vez más fructíferas. Su experiencia creció, y con ella maduró su iniciativa. Conocieron el método científico como aprendices, lo que los capacitó para elaborar contribuciones científicas importantes, y de aprendices pasaron a maestros, capaces de guiar a los aprendices de las generaciones siguientes.

La vaguedad del concepto que tienen gran parte de los hombres de ciencia sobre su disciplina, se hace ostensible en los asertos que hacen sobre la ciencia, o han hecho, algunos de ellos. Así, por ejemplo, el biólogo inglés Huxley dijo en cierta ocasión que "la ciencia es sentido común organizado." Aparte de la dificultad de precisar qué debe entenderse por sentido común y cuál, del número indefinido de acepciones que es posible darle al término organización, es la que le correspondería en este caso a la ciencia, es obvio que, de acuerdo con el uso habitual de la expresión "sentido común," los conocimientos científicos no son conocimientos de orden común. El "sentido común" hace generalizaciones que, en general, no se ocupa de comprobar. La ciencia exige que sus generalizaciones estén basadas en pruebas rigurosas que, o bien hayan sido verificadas, o bien sean susceptibles de verificación.

Otro biólogo inglés, Woodger, en su tratado sobre los *Principios biológicos* dice: "Una ciencia es un conjunto sistematizado de proposiciones que se refieren a un tema determinado." De acuerdo con esta definición, una colección de chistes sobre los pericos, en que aparecieran éstos por orden alfabético, sería un tratado científico.

Hay otra serie de asertos acerca de lo que es la ciencia, que conviene subrayar y criticar. Son los que han hecho algunos filósofos. En este caso, tales personas conocen generalmente los principios de la crítica de los conceptos, sus aseveraciones son lógicas y, a menudo, hasta retóricas. El filósofo, sin embargo, frecuentemente no conoce la ciencia, porque nunca ha sido hombre de ciencia, ni ha pasado por el largo aprendizaje indispensable para la formación del hombre de ciencia. Sus juicios son, a menudo, falsos e incompletos. Por ejemplo, el filósofo francés Meyerson dice que la investigación científica abarca dos tipos de actividades: la descriptiva y la explicativa. La primera sería la que se ocupa del descubrimiento de las leyes que rigen los eventos naturales. La actividad explicativa tendría por función la de explicar esas leyes, transformándolas de aseveraciones empíricas en asertos de identidad en el tiempo (el término de invariancia sería más apropiado que el de identidad). La formulación de las leyes de los fenómenos naturales es, en efecto, una de las metas importantes de la ciencia, pero no es la única. Por otra parte, la explicación científica no consiste en la separación de las relaciones invariantes de las contingentes, como se discutirá más adelante.

Es interesante notar que los mejores críticos y analistas de la ciencia y del método científico, toman el concepto de la ciencia por concedido. Así,

## 6 El método científico

en toda la magnífica serie de obras que el gran matemático francés Poincaré consagra al método científico, no está expresada ninguna definición de la ciencia, ni hay ninguna puntualización sobre las finalidades específicas o generales que la ciencia persigue. De manera semejante, los estudios excelentes de Whitehead y los de Russell versan sobre temas específicos relacionados con el método científico, pero no se preocupan por caracterizar este método en su conjunto.

PARA HACER CIENCIA ¿ES NECESARIO SABER QUE ES ÉSTA? Repito, sin embargo, que aun cuando no se tenga sino una noción vaga e imprecisa de la meta perseguida, se pueden hacer contribuciones importantes al desarrollo de una ciencia. Los principios generales de método, adquiridos por la lectura y durante el "aprendizaje," bastan para orientar una investigación determinada. Se pueden hacer estudios científicos valiosos con una actitud filosófica ingenua, con respecto a los fenómenos de la naturaleza que se investigan, a los procesos mentales que estos fenómenos desencadenan en el experimentador, y a las relaciones que hay entre dichos fenómenos y la teoría científica que resultó de los procesos mentales del investigador. Es sobre todo en las ciencias jóvenes o poco desarrolladas donde esta actitud no suscita obstáculos ni provoca tropiezos. Se puede, por ejemplo, contribuir a la fisiología sin haber llegado a ninguna decisión acerca de si los organismos animales tienen, o no, propiedades intrínsecas que les son privativas, y que los distinguirían cualitativamente de la materia inanimada. Es éste uno de los problemas básicos de la biología y su solución no podrá obtenerse con argumentos ingenuos o arbitrarios. En la física, las nociones ingenuas sobre el espacio y el tiempo, sobre la materia y la energía, pudieron sostenerse casi hasta fines del siglo pasado, para después colapsarse en bancarrota absoluta en el siglo presente.

La selección de problemas específicos para estudio siempre se basa, en gran parte, en la intuición. Pero, si bien es posible contribuir de modo importante al caudal científico sin un análisis, sin una crítica previa de lo que es, de lo que persigue el estudio científico y de cómo debe procederse para lograrlo, pienso que este análisis, y esta crítica, no pueden sino ayudar al investigador a obtener mejor fruto de su trabajo. La crítica no merma a la intuición en lo que ésta tiene de creadora y de fértil. La intuición sugiere, inventa, pero sólo la crítica puede mostrar cuando las invenciones o las sugerencias son malas y deben ser desechadas.

La crítica de los conceptos básicos de la ciencia y del método científico tienen, así, un doble interés. Contribuye al progreso de los investigadores y de las ciencias, aún en aquellos campos en los cuales esta crítica no es, por ahora, indispensable. Es, además, parte integrante de la ciencia en general, ya que hay campos de estudio que no pueden abordarse sin esta crítica previa. Pero sigamos buscando nuestra definición, ahora examinando los criterios populares.

LOS CRITERIOS POPULARES. Los criterios populares han evolucionado con el tiempo. La idea popular de la ciencia ha variado de acuerdo con los distintos tipos de individuos en quienes se pensaba residía la ciencia, o a quienes se consideraba como hombres de ciencia. Seguramente que los brujos, los hechiceros y los sacerdotes, fueron los primeros que fueron tomados como prototipos de seres que poseían la ciencia. Puesto que sabían comunicarse con los dioses eran, sin duda, los mejor dotados para trazar los caminos del progreso, o del bienestar común. Siguieron en turno los filósofos, los astrónomos y los astrólogos. Si ellos intentaban dar una explicación del Universo, o lo observaban directamente, o lo estudiaban acuciosamente ellos, seguramente, poseían la ciencia. Los alquimistas también tuvieron su lugar, junto con los herbolarios, agregaban la experimentación a la observación, y perseguían objetivos que parecían muy importantes. Más tarde, la ciencia empezó a desligarse de las profesiones y empezó a hacerse ciencia por el conocimiento mismo. Según los conceptos populares la ciencia parecía mostrar dos tendencias. Una, la de buscar el beneficio del hombre y de la humanidad. Su imagen estaría representada por el hombre de bata blanca, comiendo y durmiendo poco, trabajando sin descanso en un laboratorio oscuro, con grandes dificultades económicas, pero al fin triunfante en el hallazgo de un suero o una vacuna: la cura mágica de una enfermedad. La segunda tendencia, popularizada en las novelas, la de lograr el dominio, el poder y la fuerza, pasando por encima de las reglas éticas tradicionales. Representada ésta por el hombre encorvado, de torvo mirar, que incluso haría experimentos con el mismo hombre y crearía monstruos o máquinas de destrucción.

Los criterios populares para calificar un procedimiento o un estudio como científicos han sido también diversos. Entre ellos se puede mencionar a los siguientes:

a) La *descripción* de los hechos o eventos. Se ha dicho que el objeto primordial de la ciencia es la descripción precisa de la naturaleza. Este criterio es insatisfactorio. Es cierto que hay disciplinas científicas en las cuales la descripción ocupa un lugar preponderante. Así, la *anatomía*, el estudio detallado de la morfología de los organismos animales y vegetales, es una de las divisiones importantes de la biología. Pero la mera descripción, por minuciosa que sea, no constituye una aportación científica significativa; cuando mucho es solamente un primer paso rudimentario en el desarrollo del conocimiento. La descripción minuciosa de un edificio o de un paisaje no constituyen una aportación científica.

b) La *sistematización* de los hechos o eventos. Este criterio, que no es tan sólo popular (véase antes la crítica al biólogo Woodger), es a su vez, poco satisfactorio. Cualquier grupo o clase de hechos o eventos puede ser sistematizado en formas muy diversas, muchas de estas sistematizaciones serán totalmente ajenas a los propósitos científicos. Citemos como ejemplo el directorio telefónico. Como la descripción, la sistematización, aunque

## 8 El método científico

necesaria en la ciencia, no constituye sino una etapa preliminar en el desarrollo del conocimiento.

c) La *medida*. Es este uno de los criterios más populares de la elaboración científica. Cuando un industrial ofrece al público productos ensayados "científicamente" quiere decir habitualmente que, en vez de usar procedimientos empíricos para caracterizar algunas de las propiedades de su producto, se ha recurrido a un aparato de medida. Las mediciones son, en efecto, procedimientos usuales y esenciales en la ciencia. La observación científica se reduce, en última instancia, a una serie de mediciones. Pero las medidas, por sí solas, no constituyen una aportación científica. Es obvio que si una persona mide, con un gran número de decimales, las dimensiones de un edificio o de un mueble con propósitos de calcular el valor comercial, no estará haciendo labor científica.

d) La *explicación* de los hechos. Es común decir que la ciencia busca la explicación de los eventos o fenómenos. Esencialmente, explicar algo a alguien, es procurarle una satisfacción subjetiva que es sólo incidental en los propósitos de la ciencia. Este criterio, por lo tanto, tampoco es bueno por sí solo.

e) La *predicción*. Este criterio es aceptable, pero tiene limitaciones. En efecto, como mostraremos más adelante, la ciencia permite el hacer predicciones, pero no es ésta su única misión.

f) El *conocimiento* del Universo. Es este un criterio más maduro que los anteriores. Es quizá el más favorecido por los mismos hombres de ciencia. Hay una sola objeción que hacer a este punto de vista, pero ella es importante. La noción de conocimiento es subjetiva y tiene varias acepciones. Para puntualizar la acepción que corresponde al caso de la ciencia, o recurrimos a otros criterios o los englobamos con algún calificativo que, en último análisis, será equivalente a la afirmación, obviamente circular, que el estudio científico busca el conocimiento científico. Quedaría entonces por determinar cuáles son las particularidades de este modo de *conocer* que lo individualiza y lo separa de otros modos.

COMO SE HACE LA CIENCIA. Podemos abordar el problema desde otro punto de vista, o sea señalando los problemas de la investigación científica, o examinando lo que tendrían en común los tratados científicos. Para el conocimiento científico se selecciona un fenómeno o una serie de fenómenos. Para el no iniciado, esta selección podría parecer arbitraria, pero en realidad rara vez lo es. Depende de muy diversos factores que serán analizados más adelante. Estos fenómenos son siempre abstracciones de un orden elemental, ya que nunca es posible abarcar la realidad externa en su totalidad. En otras palabras, el conocimiento científico busca regularidades en la naturaleza; se ocupa de los aspectos dinámicos reproducibles de los fenómenos naturales. Se trata de establecer relaciones, entre objetos o fenómenos, que son invariantes en el tiempo y en el espacio. Se afirma

que si estas relaciones existen hoy, existieron también ayer y existirán mañana. Ahora bien, la probabilidad de que un fenómeno dado se reproduzca en su totalidad es nula: es seguro que no han habido, ni habrán jamás dos situaciones idénticas en todos sus aspectos. Es evidente, entonces, que la búsqueda de uniformidades y de reproducibilidades implica una abstracción. En una situación compleja dada, se seleccionan algunos aspectos, algunas *variables* como importantes o pertinentes, y se hace caso omiso de otras que se consideran contingentes e incidentales, desde el punto de vista de la relación particular que se explora.

La selección que hemos hecho de estas determinadas variables constituye una nueva abstracción; ahora de un orden más elevado. Se buscan entonces las relaciones funcionales entre estas variables. La formulación de estas relaciones representa una nueva abstracción, a la que llamamos una ley científica o ley natural. En cuanto posible, se busca relacionar estas leyes con otras, y relacionarlas también con objetos, hechos o eventos, distintos de aquellos a partir de los cuales se inició el estudio. A un sistema de leyes, con relaciones mutuas, lo llamamos una teoría. La teoría es tanto mejor cuanto más general es, o sea, cuanto mayor la fracción del Universo a la cual es aplicable. Hay teorías que son aplicables a todo el Universo y de ellas se enorgullecen, con toda propiedad, los hombres de ciencia que las han formulado.

Es importante que la formulación de las leyes y de sus relaciones sea rigurosa. No hay sino un lenguaje o simbolismo apropiado para este rigor, es el de las matemáticas. Por lo tanto, aun cuando son posibles y útiles las teorías científicas sin matemáticas, no son ni tan importantes, ni tan precisas como las que pueden formularse a través de ecuaciones diferenciales.

Las leyes y las teorías solamente son manejables cuando son relativamente sencillas. Como dijo Poincaré, es una fortuna que algunos de los aspectos del Universo sean relativamente sencillos. Si en vez de poco más de un centenar de elementos químicos, hubiera varios millones de ellos, la labor del químico sería prácticamente imposible.

Hemos visto que para elaborar leyes y teorías a partir de lo concreto, se procede por abstracciones sucesivas. Para probar los resultados de observaciones aún no realizadas, o para comprobar una teoría, es preciso proceder a la inversa, o sea, volver de lo abstracto a lo concreto. Uno de los problemas más interesantes en el método científico es la formulación de reglas que nos permitan pasar del fenómeno natural, de la realidad del mundo exterior, a los símbolos con los cuales expresamos las características que hemos juzgado son importantes, es decir, las reglas de adaptación de los símbolos a los hechos. Tenemos también que fijar reglas para expresar con estos símbolos las relaciones funcionales que atribuimos a las variables correspondientes, y reglas que nos permitan descubrir relaciones nuevas entre estos símbolos y otras variables. Como hemos dicho que es necesario que nuestro conocimiento no sólo codifique la experiencia presente y la pasada,

sino que también sea aplicable a la futura, permitiéndonos predecirla y controlarla, necesitamos también reglas para volver de nuestros símbolos a los fenómenos naturales. Una de las tareas más difíciles de la intuición científica es la selección de las variables pertinentes.

En otras palabras, podemos decir que la ciencia busca modelos abstractos o teóricos lógicos, que representen fielmente las relaciones funcionales invariantes que existen en la naturaleza. Estos modelos parten de experiencias pasadas y deben ser aplicables a las futuras. La ciencia empieza y acaba siempre en la naturaleza, en una realidad externa que se postula.

Tenemos así, que los criterios que mencionamos antes como inadecuados para caracterizar a la ciencia, no representan sino aspectos parciales de ella. La descripción y la sistematización son preliminares indispensables para la identificación de los fenómenos y para la selección de las variables. Las mediciones ocupan un lugar central en el método científico. Intervienen a cada paso en la evolución de una teoría, pero una teoría esencialmente cualitativa es mejor y más útil para la ciencia que una serie muy exacta de medidas que no conducen a una teoría. Nuestros métodos de medida siempre introducen un error. Por lo que se refiere a la explicación de los fenómenos, o al conocimiento de la naturaleza, podemos decir que serán tanto más completos cuanto menor es el margen de error de nuestras medidas. Si este error pudiera ser cero, la teoría científica correspondiente sería una verdad absoluta. De hecho, las teorías siempre tienen algún error, la concordancia con los fenómenos naturales es únicamente relativa. El hombre de ciencia no tiene por qué preocuparse por la atmósfera de la infalibilidad que pudiera parecer asfixiante. El error es un incentivo intelectual y es, además, un incentivo estético. La perfección absoluta no es bella, sino en tanto que es una asíntota, un ideal.

En resumen, podemos admitir que la ciencia es el conocimiento ordenado de los fenómenos naturales y de sus relaciones mutuas. Que el conocimiento científico se ocupa de los aspectos reproducibles de la naturaleza. Que el hombre de ciencia quiere sistematizar y legislar la experiencia pasada y predecir y controlar la futura.

Los pasos sucesivos en la evolución de una teoría son:

1. Selección de las variables pertinentes en un evento o fenómeno.
2. Establecer las relaciones funcionales entre estas variables.
3. Dar valores de las constantes numéricas de estas relaciones.
4. Buscar relaciones entre ésta y otras teorías.

La base de la ciencia es que el hombre tiene la curiosidad de conocer o entender a la naturaleza. Tiene el deseo de conocer el pasado, el presente, el futuro y la concatenación temporal de los fenómenos naturales. Este programa tiene, como base filosófica, la afirmación de que existe un Universo exterior, con el cual nos podemos poner en contacto a través de nuestras sensaciones. Hay que admitir que este Universo exterior es el responsable

del desarrollo de nuestras sensaciones. Hay que postular, en seguida, que hay propiedades comunes a estos diversos entes materiales que hemos construido a partir de nuestras sensaciones. Por último, se afirma que existen regularidades o uniformidades en la sucesión temporal de los eventos que ocurren en el Universo, y que estas uniformidades son susceptibles de ser formuladas bajo la forma de leyes abstractas e invariantes en el tiempo.

¿PODEMOS DEFINIR AHORA LO QUE ES UNA OBRA CIENTÍFICA? Apliquemos ahora los conceptos anteriores. Supongamos que seleccionamos los libros siguientes:

1. El *Quijote* de Cervantes o el *Hamlet* de Shakespeare.
2. Un directorio de teléfonos.
3. Una de las obras filosóficas de Russell.
4. La *Historia de la Revolución Francesa*, de Michelet.
5. Un catálogo de una casa comercial.
6. Un tratado de anatomía humana.
7. Un texto de paleontología.
8. El tratado sobre óptica fisiológica de Helmholtz.
9. La *Teoría de la electricidad*, de Maxwell.
10. Un tratado de ecuaciones diferenciales.

Preguntamos en seguida a un grupo de personas cultas cuáles de estos libros son, en su opinión, obras científicas. Creo que habrá unanimidad en el rechazo de los tres primeros. Creo que habrá diferencias de opinión, en lo que se refiere a los cuatro siguientes. Supongo que la mayoría aceptará los tres últimos, y que coincidirán en aceptar el tratado de matemáticas como uno de los ejemplos más puros de contribución científica.

El directorio de teléfonos, es altamente abstracto y sistematizado, pero sería una base muy pobre para la formulación de leyes o teorías. La información que contiene el catálogo comercial, no sería aplicable o extensible a otros hechos u objetos. *Hamlet* o el *Quijote*, encierran conocimientos profundos y leyes sobre las relaciones interhumanas pero, por su índole, las leyes que contienen tácitamente son de aplicabilidad restringida; no se prestan para la generalización. Su arte es supremo, pero su ciencia es pobre.

El texto de historia está lleno de fechas, de datos y de hechos. Es un ejemplo de labor científica tan rudimentaria, que no puede ser considerado como obra científica. La ciencia de la historia está por hacerse. Cuando exista una teoría elaborada a partir de las variables pertinentes, que permita correlacionar los eventos de distintas épocas, y cuando se puedan extrapolar a épocas no conocidas, pasadas o futuras, las leyes aplicables a las situaciones conocidas, entonces habrá una historia científica.

En realidad, de acuerdo con los criterios que hemos adoptado, *Hamlet* o *Don Quijote* son mejor material científico que un texto de historia que se limita a citar gobernantes, batallas y otros sucesos.

Las matemáticas puras no son, en mi opinión, una ciencia. Constituyen sólo parte del método científico y difieren fundamentalmente de las ciencias en muchos aspectos que serán tratados más adelante.

Finalmente, la obra de Helmholtz y la de Maxwell, son ejemplos elevados de obras científicas de primera categoría.

*Ejemplos de teorías científicas. El movimiento.* El concepto de movimiento, incluye la noción de velocidad y la noción de dirección. La velocidad es espacio recorrido por unidad de tiempo. Como lleva dirección es un vector. Si la velocidad es variable, queda representada por la derivada de la distancia, con respecto al tiempo.

Una partícula puede llevar velocidades en distintas direcciones, simultáneamente. La regla para combinar estas velocidades, fue inventada por Galileo; es la llamada ley del paralelogramo, o sea la expresión de la suma de los vectores correspondientes a cada una de las velocidades. La velocidad resultante es la derivada de los cambios de posición, con respecto al tiempo.

La medida de las velocidades se hace siguiendo estas definiciones, y escogiendo un sistema adecuado de unidades. Las medidas en el espacio se hacen con reglas graduadas. Las del tiempo se hacen comparándolas con un reloj, o sea, algún sistema o mecanismo que suponemos que tiene oscilaciones cíclicas regulares.

La aceleración representa los cambios de la velocidad y corresponde, por lo tanto, a la derivada de la velocidad con respecto al tiempo, o sea, a la segunda derivada de la distancia, con respecto al tiempo. Es evidente que la aceleración es también un vector, es decir, que tiene dirección y magnitud.

La medida experimental de los valores de la aceleración de los cuerpos que suben o caen en el vacío cerca de la superficie de la Tierra, tiene un valor que es constante para un sitio determinado. Newton atribuyó estas aceleraciones a la acción de la gravedad terrestre. Es fácil demostrar que, para que un cuerpo describa un movimiento circular o elíptico alrededor de otro tomado como centro del círculo, o como uno de los focos de la elipse, es necesario aplicar al primero, una aceleración del mismo tipo de la que corresponde a la fuerza de la gravedad.

La noción de *tiempo* la percibimos directamente. La adquirimos a través de la memoria. Nos percatamos de que las sensaciones que tenemos en un momento dado, tienen una calidad, enteramente distinta para nosotros, de otras que hemos tenido en el pasado. Llegamos así, a la noción de una sucesión temporal de nuestras sensaciones. La medida del tiempo a través de un reloj lleva ya una hipótesis implícita, la de que las oscilaciones cíclicas de nuestro reloj son regulares, por ejemplo, la sucesión temporal del día y de la noche, o la llegada del sol al cenit. Corroboramos esta regularidad, porque podemos poner en fase a distintos relojes, el del sol, el de un péndulo, o el de la frecuencia que le atribuimos a un determinado sonido.

La noción de *espacio* es inferida o aprendida. La asociamos primordialmente con nuestros movimientos, con el esfuerzo que tenemos que desarrollar para alcanzar determinado objeto que nos aparece inmóvil. Después asociamos diferencias en nuestras sensaciones visuales con estas nociones de distancia, que nos dieron los receptores quinestésicos. En la práctica, para el juicio de las distancias relativamente cortas, usamos las sensaciones que corresponden a la visión más bien que cualesquiera otras de las que poseemos para hacer estos juicios. Que esta noción del espacio es aprendida, se aprecia claramente por las observaciones que se han hecho sobre ciegos de nacimiento, y que han adquirido la vista posteriormente, a una edad madura. En este tipo de inválidos, se pasan meses, y hasta años, antes de que logren construir un espacio visual e integrarlo con el espacio quinestésico que ya tenían conocido.

De los conocimientos anteriores, se pasó enseguida a conceptos abstractos elementales, los que ya no están directamente relacionados con las percepciones inmediatas. El hecho de que objetos de dimensiones semejantes, a juzgar por las sensaciones visuales, requieran esfuerzos musculares distintos para levantarlos, o sostenerlos, condujo a la noción abstracta de *peso* o *masa*. El hecho de que se necesite un esfuerzo muscular más intenso para moverlos, condujo a las nociones de *inercia* y de *fuerza*. Para que estos conceptos sean científicamente aceptables, deben llenar determinados requisitos. El primero, es que sean susceptibles de medida exacta. Ya Galileo hizo énfasis sobre la indispensabilidad de la medición rigurosa de las propiedades que se atribuyen a la materia, y lo hizo porque quería que las leyes que describieran las relaciones entre estas propiedades fueran matemáticas. El segundo requisito es que se establezca, explícitamente, y sin ambigüedades, el método que se ha de seguir para medirlas. La consecuencia lógica de estos requisitos, es que las propiedades quedan definidas exclusivamente a través de los métodos de medida.

Se dice todavía, en tratados de física que se consideran modernos, que la masa de un cuerpo indica la cantidad de materia que contiene dicho cuerpo. Esta afirmación es de una epistemología burdamente ingenua. La masa ( $m$ ) de un cuerpo no constituye sino la medida numérica, en unidades convencionales, que resulta de la aplicación de un método especificado de medida. La forma más sencilla de medirla es por medio de una balanza, comparándola con una masa unitaria convencional. Se puede emplear como método de medida, el grado de distorsión que el cuerpo imprime a un resorte fijo por uno de sus extremos. Si estas distorsiones se calibran poniéndoles una escala, el método permite, en principio, la estimación de la masa. Pero si se toma el mismo cuerpo y el mismo resorte, y primero se mide la distorsión en el ecuador y después en el polo, las distorsiones no serán iguales. Se dice entonces, que la distorsión no depende de la masa sino del peso del cuerpo, y que hay una proporcionalidad entre masa y peso. Esta proporción depende de la fuerza gravitacional de la Tierra ( $g$ ),

que es menor en el ecuador que en el polo, ya que la distancia de estos dos sitios al centro de la Tierra, es mayor en el primer caso.

En este caso pudo hacerse ya una inferencia teórica, o sea, la definición del peso ( $p$ ):  $p = mg.$ , el peso varía cuando varía la gravedad, pero la masa no varía. Puede además concluirse que las definiciones de velocidad, de peso y de masa, deben hacerse exclusivamente a través de los métodos de medida. Falta incluir otra abstracción elemental importante en la mecánica clásica, la del *momento*. El momento se define como el producto de la masa por la velocidad.

A partir de estas definiciones, de las abstracciones elementales, y de una serie de observaciones y experimentos, formuló Newton sus tres leyes del movimiento que fueron consideradas como exactas por mucho tiempo:

1a. Cada partícula de materia, permanece en un estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, si no actúa sobre ella una fuerza exterior.

2a. La derivada del movimiento de una partícula, con respecto al tiempo es proporcional a la fuerza que actúa sobre ella, y tiene la misma dirección que la fuerza actuante.

3a. A cada acción corresponde una reacción igual y de dirección opuesta.

La primera ley se debe a Galileo, que fue el primero en reconocer que no es la velocidad de un cuerpo, sino su aceleración, lo que indica que hay fuerzas que actúan sobre él.

La segunda define a las fuerzas: la fuerza es igual al producto de la masa por la aceleración. En esta ley se basaba la teoría de Newton acerca de la inercia.

En la tercera, las acciones de las que se habla corresponden a fuerzas.

Con estas tres leyes y con la ley de la gravitación, que dice que cada partícula del Universo, atrae a cada una de las otras partículas con una fuerza que es directamente proporcional al producto de las masas de las partículas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia, se intentó derivar nuevas leyes aplicables a todos los tipos de movimiento de cuerpos, tanto en la Tierra como los de los cuerpos astronómicos.

El intento no fue satisfactorio. Para lograr leyes ajustables a los fenómenos fue preciso recurrir a hipótesis subsidiarias, a fuerzas arbitrarias adicionales que no aparecen en las leyes formuladas. La primera fue la de la fuerza centrífuga, una fuerza que se desarrolla cuando giran los cuerpos perpendicularmente al eje de rotación y con una dirección que los aleja de dicho eje. No bastó esta hipótesis subsidiaria aunque era suficiente, por ejemplo, para explicar la rotación de la Tierra alrededor del Sol, cuando se considera al Sol como fijo y a la Tierra como el elemento móvil. Desde luego, tal hipótesis sería inadecuada para explicar la rotación del Sol alrededor de la Tierra, si consideráramos a la Tierra como inmóvil, es decir, si tomáramos su centro como el eje de nuestro sistema de coordenadas. Tal

explicación implica que el Sol puede acelerar a la Tierra, pero ésta sería incapaz de acelerar al Sol. En otras palabras, no todos los sistemas de coordenadas empleados para describir los movimientos, eran satisfactorios. Para subsanar esta nueva dificultad, fue preciso formular una nueva hipótesis: la del espacio absoluto.

La segunda ley de Newton afirmaba entonces que la fuerza es el producto de la masa por la aceleración absoluta, o sea, la aceleración en el espacio absoluto. Las medidas deberían entonces hacerse, centrando a los ejes del espacio en los cuerpos tales como el Sol. Estos sistemas de coordenadas se designan con el nombre de inerciales.

Aún así, la teoría no es suficiente para explicar todos los movimientos. Fue preciso introducir nuevas fuerzas, por ejemplo, las de Coriolis que podían explicar la rotación del plano en el cual se mueve el péndulo de Foucault con respecto a la superficie de la Tierra.

No viene al caso detallar la historia ulterior del desarrollo de la mecánica. Mach, en 1872, fue uno de los primeros en someter la teoría de Newton a una crítica severa, y en señalar la arbitrariedad que se cometía al glorificar determinados marcos de referencia o sistemas de coordenadas, como los únicos apropiados para el estudio del movimiento, y en insistir que todos los movimientos son relativos, con respecto a los cuerpos que se mueven. Fue también el primero en sugerir que la fuerza inercial podía ser debida a una influencia de la materia de todo el Universo, teoría acerca de la cual no hay todavía una opinión unánime entre los físicos (véase Sciama, 1959). Las teorías sucesivas propuestas, culminaron con la teoría general de la relatividad formulada por Einstein, en la cual ya no es la masa, sino la energía, la que representa un papel preponderante. En esta teoría, los momentos no ocurren como una sucesión temporal de posiciones en el espacio Euclidiano tridimensional, sino que ocurren como eventos sucesivos en un espacio Riemanniano de cuatro dimensiones.

Es importante señalar la otra revolución en los conceptos de la física, la que se refiere a los modelos teóricos de la materia, que han ido cambiando en el transcurso del desarrollo de la mecánica cuántica. El modelo atómico desapareció. La masa y la energía dejaron de ser conceptos separables. La luz, considerada como un ejemplo de energía, se comporta, o como un efecto ondulatorio, o como si estuviera constituida por corpúsculos. Los únicos modelos de los átomos y de las partículas más elementales que los constituyen, así como los de los fotones de luz, son modelos estrictamente matemáticos, son ecuaciones que permiten calcular las propiedades asignadas a la materia o a la energía, y pasar después a los eventos naturales registrados, directa o indirectamente a través de nuestros órganos de los sentidos, para la verificación de las teorías. Se puede apreciar así, el alejamiento progresivo de las abstracciones elementales antropomórficas con las que empezó la física, hasta llegar a un modelo estrictamente abstracto de la materia.

La física se ocupa de las propiedades universales de la materia. Consideremos ahora otras ciencias. Durante muchos siglos, la química fue juzgada como una ciencia independiente de la física. No tenía la universalidad de ésta, ya que se ocupaba del estudio de distintos tipos de materia, de los elementos químicos y de sus combinaciones. En el curso de los últimos 70 años, ha desaparecido esta distinción radical entre estas dos ciencias. Las propiedades químicas de los distintos átomos, se pueden explicar por organizaciones distintas de las mismas partículas elementales. La diferencia entre dos elementos es consecuencia de diferencias en estructura atómica; número de protones, de neutrones, de electrones, etc., que contiene cada átomo, pero las propiedades de estos protones, neutrones y electrones son siempre las mismas, cualquiera que sea el elemento. Las propiedades químicas se pueden inferir así, de las leyes físicas. La química es realmente una rama de la física.

Por ahora, no se puede decir lo mismo de la biología. La biología escoge como su tema de estudio a ciertos tipos especiales de agrupaciones atómicas y moleculares, los organismos vivos. Estos organismos tienen propiedades características que los singularizan de otras agrupaciones atómicas y moleculares que no presentan estas características, y a las que designamos con las expresiones inadecuadas de materia inerte o inanimada; el adjetivo más apropiado sería el de "no vivas."

La afirmación anterior no implica que las leyes de la física o las de la química no sean aplicables a los organismos vivos. Estas leyes son rigurosamente aplicables para ellos, como para todos los demás objetos materiales. Por esto me parece inaceptable la definición que da Bohr de la física. Bohr afirma que la física es el estudio de las leyes elementales, que rigen sobre las propiedades de la materia inanimada.

El problema en la biología es el de señalar las leyes que corresponden a la organización característica de la materia de los seres vivos, lo que da lugar a la aparición de los fenómenos que nos permiten distinguir a estos organismos de otras entidades materiales. La actitud del biólogo es más semejante a la del ingeniero que a la del físico. A un ingeniero se le puede presentar el problema de diseñar un aparato que sea capaz de realizar determinadas operaciones físicas específicas, o bien, se le puede pedir que explique cuáles son los elementos desconocidos de un aparato que realiza determinadas funciones. El problema del biólogo es análogo a este segundo problema de la ingeniería. Dado un organismo vivo, que presenta determinadas propiedades ¿cuál es la estructura física y química que le permite realizar ciertas funciones cuando está colocado en un medio exterior adecuado? Si se tiene en cuenta la diferencia profunda entre las preguntas que hace a la naturaleza el físico por una parte, y el biólogo o el fisiólogo por la otra, es de suponer, *a priori*, que las leyes y teorías que formulan el uno y los otros tendrán que presentar también diferencias importantes.

Tenemos como ejemplo la teoría de la evolución de Darwin. Este tipo de teoría, no cabría dentro de los marcos de la física. Es una teoría esencialmente de tipo histórico, que no es formulable en términos matemáticos. Representa sin embargo, una de las contribuciones más importantes que se han hecho hasta ahora en biología. Hay teorías de tipo semejante en el campo de lo no-viviente, por ejemplo, las de la astronomía que se refieren a la evolución de las estrellas y galaxias. Pero aquí otra vez, la astronomía se sale del campo de la física; ya no está estudiando las leyes elementales de la materia, sino leyes que se refieren a organismos complejos, como son las estrellas y las galaxias. En ninguno de los dos casos, el biológico y el astronómico, se violan o contradicen las leyes de la física en la formulación de las teorías, pero no basta con aplicar estas leyes para hacer una reconstrucción adecuada del pasado, y del futuro de los seres vivos y de los astros.

Consideremos otras dos leyes de la neurofisiología: la ley del todo o nada, y la de la no especificidad de los impulsos nerviosos. La primera afirma que la iniciación de impulsos que se propagan en las fibras nerviosas, es un fenómeno cuántico; el estímulo tiene que sobrepasar un umbral de intensidad o de duración para poder iniciar un impulso, pero la magnitud y las características del impulso iniciado, no tienen relación alguna con las intensidades o duraciones del estímulo con valores superiores a los del umbral. La segunda afirma que los impulsos nerviosos, son semejantes en todas las fibras nerviosas, tanto en las motoras como en las sensoriales, cualesquiera que sean los músculos o los sistemas sensoriales que consideremos, tienen también las mismas características en las fibras del sistema nervioso central. Aquí, nuevamente, esta ley no es susceptible de expresión matemática y la formulación matemática de la primera, no ayudaría en nada ni para el rigor de su formulación ni para su aplicación. Son ellas, leyes que no satisfacen los requisitos que exige la física para las suyas. Son sin embargo, fundamentales para la comprensión del funcionamiento del sistema nervioso. Le imponen restricciones rígidas y le limitan los grados de libertad que posee. Un sistema nervioso, en el cual los elementos no siguieran estas leyes, tendría propiedades radicalmente distintas de las que encontramos en las especies de organismos que poseen sistema nervioso.

No quiero dejar la impresión de que ninguna de las leyes de la fisiología, es susceptible de ser expresada en ecuaciones. Las hay, y son numerosas, las que pueden ser formuladas de esa manera. Algunas de ellas son derivaciones directas de las de la física o de la química, otras no, ya que se refieren a fenómenos de los que son específicos de los organismos vivos. Muchas son meramente empíricas, es decir, que encierran parámetros y aún conceptos arbitrarios no definidos ni física ni fisiológicamente, por ejemplo; las de las teorías de la excitabilidad de las fibras nerviosas y musculares. Pienso, sin embargo, que en todo caso aparecerán en biología teorías y leyes del tipo de la teoría de la evolución que, a pesar de que no sean

susceptibles de formulación matemática son importantes, porque señalan uniformidades de aplicación muy general.

Las diversas ramas de la biología ilustran en una forma interesante, los diversos aspectos de los estudios científicos. La anatomía no es sino una descripción sistemática y detallada de la estructura de las células, de los tejidos y de los órganos de un ser vivo; no se ocupa de problemas dinámicos ni conduce a la formulación de leyes. La taxonomía no es sino la sistematización o clasificación racional de los diversos organismos, tampoco se ocupa de problemas dinámicos ni conduce a la formulación de leyes. Consideradas como disciplinas aisladas, probablemente, no merecerían el calificativo de científicas pero, sin ellas, el estudio de los procesos dinámicos, la embriología, el crecimiento, la fisiología, etc., se verían seriamente limitados o serían imposibles.

## *La observación y la experimentación*

Es clásico dividir a las ciencias en dos grupos, uno el de las de observación, por ejemplo, la astronomía; y el otro, el de las experimentales, como la física o la fisiología. Esta división implica que hay diferencias esenciales entre la observación y la experimentación científicas. De hecho, muchos de los analistas del método científico, aceptan estas diferencias e intentan proponer criterios para distinguir una de la otra.

Se dice frecuentemente que la diferencia entre una observación y un experimento, estriba en que en la primera el fenómeno en estudio se desarrolla sin interferencia externa, en tanto que en la segunda, el desarrollo de los hechos ocurre en condiciones previamente planeadas y controladas. Dicho de otro modo, la observación sería el registro, o simplemente la contemplación pasiva, de los hechos o fenómenos, tal como se presentan en la naturaleza; en tanto que la experimentación sería activa, ya que el experimentador ocasiona o suscita los fenómenos que desea estudiar. La contemplación del observador sería imparcial y pasiva, en contraste con la actitud del experimentador que sería selectiva y activa. Estas definiciones encierran dos criterios independientes para hacer la distinción de que estamos tratando: primero, el contraste entre la pasividad del observador con la actividad del experimentador y, segundo, el que se refiere a la naturaleza de los hechos estudiados, que se califican de "naturales" en la observación, y "provocados" en la experimentación.

Por poca reflexión que se haga, se llegará seguramente a la conclusión de que la sistematización de los hechos o fenómenos, en naturales y en provocados, es arbitraria. Debemos aceptar que todos los fenómenos son naturales, incluyendo los que se desarrollan como consecuencia de actividades humanas previas. Si un fisiólogo tiene interés en examinar los resultados de la sección del nervio facial, poco importará que haga su estudio en animales, a los cuales él mismo previamente cortó el nervio, o en individuos en los cuales la sección ocurrió por accidente o por algún proceso patológico. Es evidente también, que cuando Beaumont aprovechó la fístula gástrica de carácter accidental que había sufrido Alexis St. Martin, para estudiar alguna de las funciones del estómago, su estudio no fue esencialmente distinto del que habría realizado, si por ejemplo, hubiera escogido un perro y le hubiese hecho una fístula gástrica.

Antes de seguir adelante tratando de encontrar distinciones entre observaciones y experimentos, empecemos por considerar una ley de la física que es de aplicabilidad universal. Esta ley ha modificado profundamente la actitud de los hombres de ciencia, frente a algunos de sus problemas o postulados básicos. Es el principio del indeterminismo, o principio de incertidumbre, de Heisenberg.

La mecánica newtoniana suponía la posibilidad de establecer una concatenación causal, o determinista única entre los estados previos y los ulteriores de un sistema de partículas o de materia. Cuando se llegaron a conocer las leyes de esta concatenación, se decía: Si en un momento dado, se pudiera determinar la posición exacta y la velocidad de todas las partículas del Universo, se podría entonces, de acuerdo con esta teoría, inferir todos los estados del pasado, así como los del futuro. Esto implicaba, que una vez lograda esta determinación, la ciencia habría terminado su labor, podía entonces extrapolar hacia atrás y hacia delante, con precisión y sin limitaciones.

Para observar una partícula, molécula, átomo o electrón, es necesario recurrir a alguna forma de energía para ponerla en contacto, o relación con nuestros órganos de los sentidos, o con nuestros aparatos de medida. Consideremos, específicamente, la energía luminosa o radiante. No hay que perder de vista, sin embargo, que las conclusiones a que lleguemos serán aplicables a cualquier otra forma de energía. Lo que queremos decir, es que para observar una partícula es necesario iluminarla. La energía luminosa, como todas las demás formas de energía, no varía continuamente, sino por *quanta*. El *quantum* de luz es proporcional a la frecuencia. Si empleamos luz de frecuencia baja, o sea, de onda larga, el *quantum* es pequeño y nuestro poder de resolución será pobre, tanto más pobre cuanto más larga la onda. Para determinar con precisión la posición de la partícula no conviene, por lo tanto, emplear esta forma de iluminación. Habría que recurrir a radiaciones de frecuencia alta y de onda corta. Hemos dicho que en estas condiciones el *quantum* aumenta. El mínimo que podemos

emplear es un *quantum*, y el impacto de un *quantum* sobre un electrón, modifica tan profundamente el momento de este electrón, que no podremos saber cual era el que tenía antes de haberlo iluminado.

Así, es imposible determinar con precisión la posición de una partícula, porque se necesitaría luz de frecuencia infinitamente elevada. Es también imposible medir con precisión su momento, porque entonces la luz tendría que ser de frecuencia infinitamente baja. Mientras mayor sea la precisión con la que determinamos alguna de estas características, mayor será la incertidumbre con respecto a la otra.

Podría pensarse que éstas son sólo dificultades inherentes al acto de observación y que, aun cuando sea difícil o imposible medir a un mismo momento la posición y el momento de una partícula, se podrían establecer las leyes precisas que los rigen. Pero no es así, von Neumann ha demostrado que la generalización del principio de Heisenberg es tal que, no es posible formular leyes precisas sobre los eventos de las partículas elementales. La incertidumbre de las leyes de estos eventos es inevitable. Se pueden hacer, sin embargo, predicciones de probabilidad, pero la idea formulada por Laplace, citada antes, que la mecánica newtoniana permite, cuando menos en teoría, la solución definitiva del pasado y del futuro del Universo, es básicamente falsa.

Dilemas del tipo planteado por Heisenberg, son comunes en numerosos campos. Por ejemplo, si deseo medir algún fenómeno eléctrico en un organismo u otro sistema no vivo, recorro a un voltímetro, a un amperímetro o a un osciloscopio. En términos generales, mientras más rápido es el aparato, tanto menos sensible será. De suerte que la medida precisa en el tiempo implica una medida incierta de la amplitud y, a la inversa, la medida rigurosa de la amplitud implica incertidumbre en el tiempo. Un dilema semejante ocurre en la meteorología. Si se quieren analizar adecuadamente los cambios de clima que han de ocurrir día con día, se perderán de vista los cambios y las tendencias seculares y viceversa.

Volviendo a la distinción entre observador y experimentador, consideremos ahora el criterio de actividad o pasividad del investigador. La actividad en cuestión, podrá ser física o podrá ser mental. Si ha de ser física, cabría nuevamente subdividirla, distinguiendo los casos en los cuales esta actividad no contribuye directamente al desarrollo del fenómeno, para separarlos de aquellos otros en los cuales sí contribuye. No creo que haya alguien que piense que el estudio de un fenómeno astronómico, sólo constituye observación cuando el astrónomo se concreta a registrar lo que su telescopio le revela, y hace después las medidas correspondientes, y que sería experimento cuando el mismo astrónomo tuviera que trasladarse a una región remota de la Tierra para hacer tal estudio. Es evidente que en ninguno de los dos casos, el astrónomo estará modificando el fenómeno. Por lo tanto, habrá que considerar como actividad física pertinente sólo a aquella que interviene en el desarrollo del fenómeno.

En su admirable *Introducción al estudio de la medicina experimental*, discute Claudio Bernard, el tema del que nos estamos ocupando y señala que la única forma de actividad que puede ser pertinente al problema, es la mental y no la física. Esta diferencia en la actitud mental del experimentador contrastada con la del observador, está implícita en la afirmación de Cuvier que "el observador escucha a la naturaleza, en tanto que el experimentador la interroga y la obliga a descorrer sus velos." La misma idea está implícita en las expresiones del propio Bernard, cuando dijo que "la observación muestra, en tanto que la experimentación instruye," y que "la experimentación es una observación razonada."

Pero si vamos a aceptar que el experimentador difiere del observador en que desarrolla actividad mental, es preciso para que nuestra distinción adquiriera significación, que definamos cuál es la actividad mental pertinente, porque es obvio que podría haber muchas que no lo fueran. Bernard no propone definición alguna y su análisis, en consecuencia, resulta incompleto y confuso. Su confusión proviene de que, a pesar de haberse percatado de que la distinción entre una observación y un experimento es en gran parte ficticia, no se resignó a aceptar las consecuencias de este punto de vista, sino que insistió en mantener la diferencia entre las ciencias de observación y las de experimentación, tal vez porque ya había señalado que la distinción entre un observador y un experimentador es posible y es importante.

La dificultad para establecer diferencias entre observación y experimentación, deriva del hecho que un experimento incluye habitualmente observaciones, observaciones que en nada difieren de las que se harían en el caso de una observación pura. Lo importante es que el experimento, además de las observaciones, incluye otros aspectos. Aceptaremos que el observador se limita a registrar, o a percibir los hechos o fenómenos. La observación será tanto mejor, más completa y valiosa, cuanto más minuciosa y exacta la percepción. El experimentador no se limita a percibir. Busca una correlación teórica entre algunas de las variables que intervienen en el fenómeno, o bien, busca la cotejación de una relación teórica, que ya ha intuido o establecido, con el desarrollo real del fenómeno. En otras palabras, en la observación pura no hay teoría, en tanto que un experimento es una observación o una serie de observaciones, encaminadas a la búsqueda o a la verificación de una teoría. Con este criterio, logramos expresar en una forma más precisa el pensamiento intuitivo que encerraban la 'interrogación' de Cuvier o el 'razonamiento' de Bernard. Pero con este criterio desaparece también, por completo, la división entre las ciencias de observación y las de experimentación. De hecho, todas las ciencias están basadas en observaciones, y sus hipótesis y teorías están también controladas por observaciones. Pero todas las ciencias requieren para su desarrollo la experimentación, en el sentido que le hemos asignado a esa palabra aquí.

Las medidas astronómicas que tuvieran por objeto averiguar cuál de las dos teorías de la gravitación es la que concuerda mejor con los hechos,

constituyen un experimento de acuerdo con el concepto al cual hemos llegado. Si a alguien le parece que se hace violencia al lenguaje cuando se llama experimento a un proceso que incluye observaciones astronómicas, se le podría pedir que defina con precisión lo que entiende por experimento, o bien, que proponga otro término para expresar entre la mera contemplación del Universo y la contemplación que tiene por objeto el construir o criticar una teoría científica. El experimento incluiría, precisamente, el manejo de las dos teorías rivales y su cotejación con los hechos.

Aun con el criterio que hemos adoptado aquí, las diferencias entre la observación y la experimentación son esencialmente de grado; son cuantitativas más bien que cualitativas. En efecto, siempre nos será posible encontrar ejemplos de experimentos, en los cuales el aspecto teórico varíe desde una pequeña a una gran proporción. En cualquier experimento siempre habrá datos de observación pura, es decir, datos que son extraños a la teoría que se quiere elaborar o cotejar. Además no creo que sea posible para un hombre de ciencia, hacer observaciones puras; sus intereses y su experiencia le obligan a teorizar, le obligan a agregar un concomitante científico activo a la mera percepción de los fenómenos. Por otra parte, de hecho no es posible hacer observaciones puras, es decir, percepciones imparciales y pasivas, en las cuales el observador no participe sino como espectador, sin modificar para nada los fenómenos que investiga. El ideal de la observación científica es precisamente éste, pero ese ideal es inalcanzable. Quisiéramos que los hechos científicos fueran un reflejo simbólico exacto de la realidad exterior pero, como veremos a continuación, el observador siempre interviene en los fenómenos en estudio, la sola presencia del observador modifica en mayor o menor grado al fenómeno estudiado.

La participación del observador es mínima en determinados casos. Las observaciones astronómicas, por ejemplo, no van a modificar la posición de los astros o sus movimientos. Hay que hacer notar que el astrónomo trabaja, en general, sobre acontecimientos que sucedieron muchos años ha, por el tiempo que han tardado las radiaciones en llegar hasta nosotros. Sin embargo, el observador puede desempeñar un papel en los resultados obtenidos. Hay que tener en cuenta que el hecho astronómico, es la placa fotográfica, no el astro mismo. Así, el astrónomo selecciona el método de registro, y el resultado final dependerá de esta selección. Además, la precisión de sus medidas está limitada por el poder de resolución de su lente o espejo, y por el de la placa fotográfica que emplea para el registro del fenómeno.

La importancia del método seleccionado es esencial, y quedará mejor ilustrada por otros ejemplos. Así, hace años hubo una discusión prolongada entre Cannon, por una parte, y Stewart y Rogoff por la otra, acerca de si la secreción de adrenalina por la medula suprarrenal es intermitente o continua. Se discutían teorías, pero la desavenencia teórica dependía de hechos, y estos hechos eran distintos. La diferencia provenía, de que se

empleaba un método distinto para medir la secreción de adrenalina en uno y en otro laboratorio. Otro ejemplo, es el caso de los estudios histológicos. Para investigar la morfología de un tejido, es preciso emplear técnicas de fijación y de coloración, las cuales modifican al material observado. No es excepcional que aparezcan al microscopio imágenes claras, y hasta elegantes, de estructuras que no existen en las células normales, sino que fueron creadas por el método de fijación y de coloración empleados.

Vemos así, que el hecho científico no es sólo función de la realidad exterior, sino también del método seguido para el registro de esta realidad. Quiero citar otros ejemplos, porque la noción expuesta es fundamental para la interpretación de los hechos. Para medir los fenómenos eléctricos en un nervio, tengo que aplicar electrodos y conectarlos con un aparato adecuado. Este aparato tiene una resistencia determinada, y esta resistencia modifica los fenómenos observados. Además, cuando registro determinada diferencia de potencial, antes de decidir que ella es originada en el tejido, tengo que descontar la diferencia de potencial establecida entre mis electrodos metálicos y el nervio. En este caso, como en el del anatomista, mi hecho de observación va a ser modificado por el método que yo emplee. El fisiólogo belga Rylant publicó, hace algunos años, registros del electrograma del corazón que contenían mucho más accidentes, de los que hasta entonces habían sido descritos. Matthews mostró, poco después, que estos accidentes en los registros no tenían su origen en el corazón, sino en el amplificador eléctrico que Rylant había construido.

Así, el papel del observador en la observación tiene dos aspectos. Uno, puesto que la observación es, en parte, función del método seleccionado, el observador interviene cuando escoge un método determinado. La segunda forma de la intervención del observador en lo observado, aparece claramente en las ciencias humanísticas. El resultado de un psicoanálisis, no depende tan sólo de la forma de la neurosis del paciente, sino que también, e importantemente, de la personalidad del psicoanalista. En efecto, lo que los psicoanalistas llaman hechos de observación, y publican como tales en sus informes, son función, en gran parte, de esa relación oscura entre el analizador y el analizado, a la que ellos llaman la "transferencia." Esta transferencia es función de la opinión que el analizado se forme del analizador.

Tomemos como otro ejemplo, la extensa encuesta que se llevó a cabo en los Estados Unidos de América sobre la conducta sexual, o las costumbres sexuales, de los individuos, hombres y mujeres. Los hechos, en este estudio, sólo pudieron ser recogidos a través de una serie de preguntas. No es necesaria mucha reflexión para comprender que, las respuestas de cualquiera de los individuos observados a preguntas acerca de sus hábitos sexuales dependerá, en gran parte, de quién hizo las preguntas y cómo las hizo.

Como ejemplo final, quiero citar los interesantes estudios antropológicos de Bateson y Mead, sobre la vida social y la ética de los habitantes de las

Islas Bali. Escogieron una comunidad pequeña, aislada, tan poco contaminada como posible por las influencias occidentales. La idea fue buena, pero debe haberse producido una explosión de cambios, cuando llegaron los occidentales Bateson y Mead y empezaron a comer con tenedor y cuchara, a tomar baños frecuentemente, a tomar fotografías y a hacer una serie grande de preguntas sobre temas personales y sociales. Es evidente que el estudio final, muestra una vida social que seguramente difiere de las costumbres que privaban en esa comunidad, antes de la visita de los antropólogos americanos.

En vista de lo señalado es ineludible concluir:

1. Los llamados hechos de observación, son función de la realidad exterior, pero también lo son de las ideas del observador, y del método que escoge para hacer la observación.

2. El observador difícilmente puede ser pasivo e imparcial.

3. Los hechos científicos, son un modelo abstracto seleccionado de la realidad, no son entidades concretas. Por eso hay discusiones en la ciencia, no tan sólo acerca de las teorías sino también acerca de los hechos.

Una gran mayoría de los hechos de observación, encierran en su formulación explícita o tácitamente, interpolaciones, y muy a menudo extrapolaciones. Ahora bien, tanto las interpolaciones como las extrapolaciones son arbitrarias, son artefactos humanos que muy a menudo no concuerdan con la realidad exterior. Para el hombre de ciencia el problema no es tan sólo hacer armonizar sus teorías con la realidad, sino también buscar una concordancia entre sus *hechos* y esta realidad. Los hechos científicos son más variables que la realidad, ya que es necesario modificarlos a medida que progresan los observadores y sus métodos de observación. Hay que tener presente, sin embargo, que el principio de incertidumbre de Heisenberg marca un tope inexorable a la precisión de las observaciones y que, quizá, nunca se podrá lograr la concordancia entre los hechos de la ciencia y la realidad.

El hecho, reducido al hecho, al empiricismo puro de Hume, donde la realidad no es más que la sensación de la experiencia inmediata, no es el hecho de la ciencia. Tampoco lo es el hecho del racionalismo puro, colección de universales platónicos. Los universales de la ciencia se modifican con el tiempo y, en general, no son útiles sino después de una serie de modificaciones. Nuestros conceptos actuales sobre la evolución filogenética, o sobre la energía, son muy distintos de los que se tenía de ellos hace un siglo. Hay, en realidad, una incompatibilidad fundamental entre el racionalismo y el empiricismo: cualquiera de ellos en forma pura, excluye al otro. El hombre de ciencia, sin embargo, necesita de los dos. Como dice Wiener,\* el hombre de ciencia sólo tiende asintóticamente a esos extremos. Habitualmente les aplica un criterio indeterminista; decide que, ya que una ciencia

\* Norbert Wiener murió el 18 de marzo de 1964, en Estocolmo, Suecia.

constituida únicamente por proposiciones acerca de universales estaría fatalmente alejada de la realidad, y ya que una colección de hechos puramente empíricos no se prestaría para hacer generalizaciones, prefiere adoptar un término medio, a sabiendas que esta actitud acarreará ineludiblemente cierto grado de incertidumbre.

La filosofía de la ciencia es una filosofía dualista: separa a la realidad exterior, por una parte, y al observador, o experimentador, ya que no hay una distinción fundamental entre estos dos últimos, por la otra.

La sugestión de Russell, de un monismo neutro, no es aceptable para la ciencia, sino cuando se acepta que las manifestaciones "materiales" de la entidad o sustancia matriz neutra, son independientes de sus manifestaciones "mentales." Pero entonces, el monismo neutro se convierte en un sistema dualista. Si la ciencia es una serie de procesos mentales que empieza y acaba en una realidad exterior, la filosofía de la ciencia, tendrá que ser necesariamente dualista. Pero el dualismo es un punto de vista filosófico débil y criticable. ¿Significa esto que los hombres de ciencia han adoptado entonces un sistema filosófico pobre? Seguramente que no, porque han encontrado una solución ingeniosa cuando decidieron que, al discutir los hechos, no discuten a la realidad exterior, sino que discuten entidades abstractas de bajo orden. En estas entidades, los particulares tienen determinado grado de universalidad, y los universales son más modestos que los de Platón.

# *Las matemáticas y la ciencia*

Conviene, primero, considerar si las matemáticas constituyen una ciencia al igual que las otras, o sea, si sus propósitos y sus métodos son iguales, por ejemplo a los de la física, o a los de la fisiología; la segunda consideración es la del papel que desempeñan las matemáticas en las ciencias experimentales.

Es muy general la idea de presentar a las matemáticas como una ciencia comparable con las demás. La expresión popular de "ciencias exactas" que incluye a las matemáticas, involucra este pensamiento. La conocida frase de Gauss: "Las matemáticas son la reina de las ciencias, y la teoría de los números es la reina de las matemáticas," atestigua que también los matemáticos, y aún los mejores de ellos, consideran que su disciplina es científica.

Cuando se ha tenido la oportunidad de observar de cerca los métodos de trabajo de los matemáticos, y los de los hombres de ciencia, se encuentran fácilmente numerosas semejanzas en sus puntos de vista y procedimientos. Así, la ciencia empieza por seleccionar las variables de observación, al igual que la matemática selecciona sus problemas. La selección de las variables, y el tipo de experimento que se realiza a partir de ellas, están subordinados a una hipótesis de trabajo que sugiere la intuición. El método experimental que debe emplearse para buscar la concordancia entre los hechos de observación, y el modelo teórico provisional proporcionado por la hipótesis de trabajo es, a su vez, sugerido en gran parte por la intuición.

Empecemos por la importancia de las intuiciones en uno y en otro campos. La intuición en la ciencia, empieza en la selección del problema por estudiar, y en el acierto en la búsqueda de las variables pertinentes. Excepcionalmente, es obvia la importancia de un tema o la banalidad de otro. Puesto que el investigador original está siempre en las fronteras del conocimiento, y que la importancia de un estudio depende, además de su generalidad, de las nuevas fronteras que abre, lo frecuente es que sólo se puedan entrever sus consecuencias. Sin embargo, vemos a un investigador de talento, encontrar repetidas veces temas de grandes alcances y consecuencias, y formular preguntas trascendentes y pertinentes.

La intuición desempeña también papeles semejantes en los estudios matemáticos. Sólo un matemático de poca madurez y pocos alcances, manipularía símbolos sin un propósito deliberado. La selección de los problemas es, aquí también, un proceso que escapa a cualquier codificación precisa. El buen matemático, sospecha que algún campo será fructífero. Anticipa también una respuesta a su investigación, y esta anticipación le proporciona lo que podríamos llamar una hipótesis de trabajo. El problema de encontrar un método de demostración adecuado, por ejemplo, o de encontrar una función auxiliar que permita dicha demostración, requiere la formulación anticipada, intuitiva, del teorema que se busca. La situación no es esencialmente distinta, de la del problema de encontrar las condiciones experimentales apropiadas, para buscar la confirmación de una hipótesis de trabajo en ciencia.

Merece énfasis esta importancia de la intuición, porque no aparece en los productos finales, en las publicaciones científicas o matemáticas. En general, el autor omite toda indicación de los pasos correspondientes en el estudio. Lo hace, por una parte, para mayor claridad en su exposición; por la otra, porque considera que son éstos, aspectos demasiado personales y por tanto ajenos a un documento científico, que debe ser esencialmente impersonal.

Aun cuando las leyes matemáticas, se anuncian habitualmente bajo la forma de lemas o teoremas, tienen en común con las leyes científicas el afirmar la existencia de relaciones entre distintas entidades. En la ciencia, estas entidades pueden tener un carácter relativamente concreto, en las matemáticas ellas son esencialmente abstractas.

El concepto de una teoría, es el mismo para un matemático que para un hombre de ciencia. En uno y en otro caso, se trata de relaciones funcionales de orden general, es decir, son altamente abstractas y aplicables a un gran número de casos particulares.

Daré un ejemplo, detallando las etapas de un estudio que realizamos en el Instituto Nacional de Cardiología. A partir de la demostración de que el aleteo auricular se debe a la propagación unidireccional, no interrumpida, de impulsos, alrededor de un obstáculo apropiado, nos propusimos estudiar el problema de la iniciación de esta alteración. Sabemos que los

estímulos aplicados en un tejido excitable de dos dimensiones, como la aurícula, se propagan concéntricamente a partir del punto estimulado, hasta alcanzar los confines del tejido. Las condiciones experimentales que logran evocar el aleteo, nos habían sugerido que el factor esencial es la estimulación durante el periodo refractario. Como sistema más sencillo se me ocurrió probar el nervio, un material de estudio mejor conocido, más fácil de manejar, y un conductor de una dimensión. Supuse de antemano que la estimulación durante el periodo refractario, daría lugar a un impulso que se propagaría sólo en una dirección. Escogí un dispositivo experimental adecuado y las observaciones confirmaron mi predicción. El trabajo ha sido publicado. Siguiendo la convención habitual empieza por el propósito, es decir, por la formulación de la pregunta: ¿Qué hacen los estímulos aplicados al nervio durante su periodo refractario? Describe después el método, los resultados y, al final, después de la discusión de estos resultados se da la conclusión, o sea, se presenta la respuesta por la cual empezó el estudio.

Igual ocurre con las matemáticas. Yo vi trabajar a Wiener. Su labor esencial era descubrir el problema y adivinar la respuesta. Después su experiencia le dictaba el camino más apropiado para demostrar la verdad de dicha respuesta. En la publicación, empezaba por los teoremas conocidos que seleccionaba al final, y terminaba mostrando los nuevos que eran los que inicialmente había anticipado.

No es excepcional que se afirme que las ciencias experimentales, difieren de las matemáticas en que las leyes y las teorías científicas, son en general, el resultado de inducciones, en tanto que el razonamiento matemático es esencialmente deductivo. Hay quienes piensan que todo el contenido de las matemáticas, se encierra en un número reducido de definiciones, de postulados y de axiomas, y que el papel de las matemáticas es, simplemente, exhibir las relaciones ocultas que encerraban los postulados, y los axiomas mediante una serie de deducciones sucesivas. Si esto fuera cierto, las matemáticas no serían sino una muy grande y elaborada tautología. Además, la creación matemática fructífera, habría cesado en el momento de indicar los postulados y axiomas, y las reglas para las operaciones que deben hacerse con los símbolos.

Como lo hace notar Poincaré, este punto de vista se desentiende de la existencia de uno de los métodos de razonamiento más fértiles e importantes de todos los que usa el matemático, a saber, la inducción matemática. El método consiste en demostrar que, si determinada relación es cierta para variables con un índice  $n$ , en las que  $n$  representa cualquier número entero, entonces es necesariamente cierta cuando el índice es  $n + 1$ . Si entonces se muestra que es cierta para algún caso particular, es decir, para  $n = 1$  ó  $2$  ó  $3$  etc., se generaliza afirmando que es cierto para *todos* los valores posibles de  $n$ .

Es cierto que este tipo de inducción, difiere en varias características de las inducciones de las ciencias experimentales. Sin embargo, en uno y

en otro casos, se obtiene una generalización. En las matemáticas se obtienen relaciones nuevas que no estaban implícitas en los postulados y axiomas originales. La deducción sola no hubiera sido suficiente para establecer estas relaciones.

Tanto en las matemáticas como en la ciencia, el método deductivo solamente es introducido al final de la investigación, para obtener una demostración rigurosa, es decir, para mostrar que los resultados no son inconsistentes.

Hay dos tipos de matemáticos: el resolvidor de problemas, que emplea casi exclusivamente el método deductivo, y el elaborador de teoría, que rara vez puede dispensarse de la inducción. Igualmente hay dos tipos de investigadores en las ciencias experimentales: el que se dedica a buscar aplicaciones de principios, así sean prácticas o teóricas, y el que persigue la elaboración de los principios que después serán susceptibles de aplicación. Aquí, como en las matemáticas, la inducción es casi siempre indispensable para la elaboración de un principio.

Hasta aquí las semejanzas son ostensibles, consideremos ahora las posibles diferencias.

Como ya señalé, los pasos de lo concreto a lo abstracto, y de lo abstracto a lo concreto, son características esenciales de la actividad científica. Los hechos iniciales sugieren un modelo teórico, y este modelo no es satisfactorio, sino cuando es aplicable a hechos ulteriores. Así, aun cuando la ciencia es esencialmente una construcción abstracta, empieza y acaba en lo *concreto, en los hechos*.

El matemático parece no manejar nunca lo concreto. Sus elucubraciones son siempre en el dominio de lo abstracto. Sube y baja dentro de la escala de las abstracciones, aparentemente sin llegar nunca a ponerse en contacto con la realidad exterior.

De hecho esta distinción, aunque legítima, no es sino relativa. Ya dijimos que los hechos del hombre de ciencia son abstracciones, aun cuando de bajo orden. Y algunas de las abstracciones de los matemáticos son también de un orden relativamente bajo, por ejemplo, los números, y algunos conceptos geométricos elementales. Todavía está abierta la discusión entre los matemáticos, acerca de si el matemático puede escaparse del mundo exterior, es decir, acerca de si es posible una matemática pura, totalmente independiente de la experiencia, que nos proporcionan los órganos de los sentidos. El problema es crucial para las matemáticas. Podríamos formularlo como sigue: ¿Puede formarse un sistema axiomático consistente que sea aplicable a conceptos puramente abstractos capaces de ser definidos con precisión?

Grandes matemáticos, como Poincaré y después Brouwer, negaron la posibilidad de dar una definición precisa, no intuitiva, a los conceptos de: número, orden, secuencia o espacio. Los formalistas puros, con Hilbert (de nuestra época el exponente más destacado del grupo), se propusieron lo-

grarlo. No han alcanzado el éxito que esperaban. Euclides (año 300 a. C.) no alcanzó la axiomatización completa de su geometría. Sus definiciones son descripciones intuitivas, y su lista de axiomas es incompleta. No fue sino hasta después que Pasch, en 1880, enunció los axiomas que se refieren a los problemas de ordenación, que Hilbert, en 1899, dio una lista completa.

El formalismo puro pensó haber logrado su objetivo en 1926, cuando Ackermann y von Neumann, parecían haber establecido la consistencia de la aritmética, o sea, de un sistema axiomático que incluía el principio de la inducción. Sin embargo, en 1931, Gödel demostró que en cualquier sistema formal: 1) se pueden encontrar proposiciones aritméticas elementales, obviamente ciertas, que no pueden ser deducidas del sistema, y 2) que la consistencia del sistema no puede ser deducida a partir de dicho sistema; o dicha deducción haría al sistema inconsistente. En otras palabras, si un sistema axiomático es consistente, la prueba de su consistencia es imposible. Es lo que se conoce como teorema de Gödel.

Llegamos así a la conclusión que las matemáticas, como las otras ciencias, encierran probablemente conceptos intuitivos y necesitan recurrir a la inducción.

Pudiera pensarse que una diferencia esencial entre las matemáticas y la ciencia estriba en que, siendo las matemáticas en gran parte, si no en su totalidad, creación humana, es natural que existan distintas matemáticas. La teoría científica, en cambio, pudiera quizá ser única, ya que ha de ajustarse al Universo particular en el cual vivimos. Como ejemplos de distintas matemáticas, pueden citarse las geometrías no-euclídeas. Sin embargo, de hecho también son posibles distintas teorías científicas, acerca del mismo grupo de hechos o fenómenos. Por ejemplo, para los fenómenos en escala gruesa, la mecánica newtoniana es tan satisfactoria como la einsteiniana. Como otro ejemplo, citemos el hecho de que la astronomía de Copérnico y Kepler sustituyó a la de Ptolomeo, no por más cierta sino por más sencilla. Formalmente no hay distinción posible entre las vibraciones u ondas transversales y las longitudinales, de tal manera que la teoría de las vibraciones de las cuerdas o de la luz, puede desarrollarse basada en uno o en otro concepto. En fisiología tampoco hay distinción formal posible, entre las llamadas teorías del dipolo y teoría de la negatividad para la propagación de impulsos.

Debemos entonces concluir que, no hay diferencia esencial alguna entre las matemáticas y las ciencias experimentales, o sea, que las matemáticas son una ciencia como cualquier otra. No lo creo. Hay una diferencia esencial, a saber, que la prueba o demostración matemática es exclusivamente un problema de lógica, de consistencia. La prueba en la ciencia requiere también lógica, y es inaceptable si contiene o implica argumentos y bases ilógicas. Pero esta prueba requiere además que haya una concordancia rigurosa entre el modelo teórico y la realidad exterior. El matemático no tiene que subordinar sus teorías sino a la consistencia y a la lógica; el hom-

bre de ciencia tiene que subordinarlas a los hechos. La palabra *verdad* tiene un significado muy distinto en las matemáticas y en la ciencia.

Aun cuando reconozcamos una diferencia esencial entre las matemáticas y la ciencia, debemos tener en cuenta que la ciencia sin matemáticas es una ciencia pobre y limitada. En la física, es ésta una verdad que nadie se atrevería a contradecir. En otras ciencias, la biología por ejemplo, y especialmente en las llamadas ciencias humanísticas, probablemente muchas personas disenterían de este parecer. En primer lugar, conviene dejar establecido que se puede hacer ciencia útil y aplicable, sin tener que recurrir a las matemáticas. Por ejemplo, la teoría de la transmisión química de los impulsos nerviosos, no tan sólo se ha ajustado a los hechos y ha permitido predecir los resultados de experimentos nuevos, sino que ha servido de base para la sistematización racional del capítulo de la farmacología que se ocupa de las drogas que tienen acción sobre los efectores controlados por el sistema nervioso autónomo. Ahora bien, esta teoría encierra tan sólo un mínimo de matemáticas. Por otra parte, no todos los análisis matemáticos de los problemas científicos, son ciencia o parte importante de la ciencia. Hace varios años, leí un artículo en el *Journal of General Physiology*, en donde el autor, cuyo nombre no recuerdo, consideraba con todo lujo de diferenciales e integrales lo que ocurriría en determinada especie si tuviera determinada característica, que de hecho no se sabe que la tenga, ni hay motivos para pensar que se la descubra en el futuro. Es obvio que éste no es un trabajo científico, de acuerdo con los criterios que hemos adoptado para caracterizar la ciencia; es un juego más estéril que el del logístico que se preocupara por saber si es posible caracterizar lógicamente "la clase, de todas las clases de proposiciones, que son mutuamente contradictorias." De tal manera que la afirmación que se ha hecho alguna vez, de que la madurez y el progreso de una ciencia son directamente proporcionales a la cantidad de matemáticas que encierra, debe tomarse con una buena dosis de sal.

La historia de la física, seguramente la más madura de todas las ciencias, nos demuestra, sin embargo, el papel importantísimo que desempeñaron las matemáticas en su desarrollo. La física empezó, como todas las ciencias, con hipótesis y teorías cualitativas y relativamente poca formulación matemática. Pero no fue sino hasta que se desarrolló la llamada física matemática, o teórica, cuando alcanzó esta ciencia el auge y apogeo que ahora tiene. En fisiología aún estamos en el periodo de transición. Hay un gran número de hechos y relaciones que son esencialmente cualitativos. Hay varias teorías importantes y útiles. Pero la fisiología teórica apenas empieza. Me atrevo a augurar que el resto de este siglo verá un aumento enorme de los trabajos teóricos, es decir, matemáticos, y que este aumento implicará una aceleración marcada en el progreso de la fisiología.

La opinión del filósofo norteamericano Northrop, que dijo que el excesivo afán de matematizar, ocasionó la decadencia de la ciencia griega y

favoreció el desarrollo del espíritu oscurantista medioeval, es una opinión falsa, por ligera, de una persona que no conoce de ciencia y de su historia lo suficiente. Hypatia y sus predecesores alejandrinos, no representan una decadencia por haberle dado énfasis excesivo a las matemáticas, sino porque no reconocieron que las matemáticas, en la ciencia, no dictan normas a la naturaleza sino que deben ajustarse a ella. La característica esencial del Renacimiento fue el interés renovado en los fenómenos naturales, en su análisis por el método experimental y en su formulación, con el único lenguaje preciso que se conoce: el lenguaje matemático, que por lo demás está admirablemente adaptado a las necesidades de la ciencia. Galileo no fue sólo un gran físico, fue además un excelente matemático, y Newton fue un gigante en los dos campos.

Es un error funesto pensar que pueda haber alguna ciencia que pueda desentenderse de las matemáticas. Estas podrán no ser necesarias durante los balbuceos titubeantes que tienen que dar los primeros exploradores en un campo científico. Ninguna ciencia puede ser considerada como adulta, sin embargo, sino cuando sus leyes y teorías son precisas, es decir, cuando son expresadas por ecuaciones diferenciales.

En cuanto a las matemáticas por sí mismas, hay grandes matemáticos, casi todos los clásicos, y Wiener entre los modernos, que opinan que la matemática pura es relativamente estéril. Se convierte en una especie de juego intelectual con todo el atractivo de cualquier juego, especialmente de los que son complicados y variados, pero con la esterilidad que es inherente por definición a un juego. Los grandes triunfos de las matemáticas han sido en su mayoría, hasta ahora, teorías aplicables al mundo exterior. Esto quizá no les agregue méritos, pero seguramente que no se los quita.

No es mi deseo condenar los estudios puramente abstractos, sino el de señalar el peligro que corren los que a ellos se dedican, sobre todo si se proponen huir sistemáticamente de la realidad. El estudio de las relaciones puramente formales, tal como lo persigue la matemática pura o la logística, o lógica matemática, puede ser tan abstracto que no tenga más interés, sino para los que a él se dedican. Conviene recordar, sin embargo, que cuando se introdujeron las cantidades imaginarias a la matemática, parecían tan alejadas de la realidad como pudiera ser cualquier otro concepto matemático puro. Y sin embargo, años después los físicos encontraron que estas cantidades, eran un lenguaje ideal para expresar diversos aspectos de los fenómenos eléctricos, y vieron que la teoría de las cantidades imaginarias les permitía elaborar, sin retoques, teorías sobre la electricidad.

# *El criterio del operacionalismo*

## *Proposiciones cognitivas y no-cognitivas*

El tema que trato en seguida es esencial para la crítica del método científico, ya que comprende el problema de la simbolización de los hechos y de las teorías científicas. Comprende también el problema de la delimitación del campo de las actividades científicas. En vista de que estos problemas son amplios y complejos, mi presentación no podrá ser sino incompleta. Como, además, dista mucho de haber concordancia entre los hombres de ciencia sobre estos problemas, los puntos de vista que voy a defender representan, en general, opiniones personales.

El interés por el problema de las relaciones entre el lenguaje y los fenómenos naturales o reales, o sea, lo que abarca el término de "semántica" es antiguo. Recientemente se ha reavivado e intensificado por diversos motivos, entre los cuales destacan dos. 1) El desarrollo de las matemáticas formales, y el de la lógica simbólica o matemática, ha culminado en la apreciación de que estas dos disciplinas tienen un parentesco íntimo, si es que no constituyen una sola. Hay quienes piensan que la lógica no es sino un capítulo o un aspecto de las matemáticas. A la inversa hay quienes afirman que todos los sistemas matemáticos no son sino sistemas lógicos (Russell). La comunidad de intereses y material estriba en que, tanto la lógica como las matemáticas, se ocupan de exhibir y codificar relaciones abstractas. Ahora bien, la aplicabilidad de las reglas adoptadas para estas relaciones, exigen el análisis de las nuevas relaciones que puede haber entre los símbolos y los fenómenos, a los cuales serán aplicados. 2) La revolución

profunda en el modo de pensar de los físicos, ocasionada por la aparición de la relatividad de Einstein y después por la teoría cuántica. Esta revolución obligó a los hombres de ciencia a revisar sus principios básicos, y esta revisión incluyó obligadamente el examen de las relaciones entre sus hechos y experimentos, y las teorías elaboradas a partir de ellos.

No es extraordinario entonces que, partiendo de bases e intereses distintos, un grupo de filósofos y logistas (encabezados por Wittgenstein), y un experimentador (Bridgman), hayan llegado independientemente a conclusiones semánticas que tienen mucho en común.

Wittgenstein y colaboradores (del llamado círculo vienés de los positivistas lógicos), insisten en que hay dentro de un lenguaje dado, muy distintos tipos de proposiciones que se pueden agrupar en lo que ellos llaman distintos universos de discurso. Una primera división importante, separa a las expresiones que tienen por objeto transmitir conocimientos o información, a las que Feigl designa como cognitivas, de las que no persiguen este fin, o sea, las no-cognitivas. Estas últimas pueden evocar emociones, imágenes, acciones, pero no son vehículos de conocimientos.

Es claro que, en distintas circunstancias, una misma frase puede tener significación cognitiva o no-cognitiva, pero la separación de los distintos significados es esencial para el presente análisis. Es esencial, porque la ciencia no puede aceptar sino afirmaciones cognitivas, ya que busca precisamente el conocimiento, y porque, si bien una frase cognitiva puede tener a menudo significación no-cognitiva, hay expresiones que son exclusivamente no-cognitivas. Huelga citar ejemplos de este último tipo, cualquier poema las contendrá en abundancia, como también cualquier discurso político.

Feigl subdivide a las proposiciones cognitivas en dos subgrupos: *a*) las que tienen una significación puramente formal o estructural, y *b*) las que tienen una significación empírica, en relación con hechos o fenómenos de la realidad exterior. Carnap llama a las primeras analíticas y a las segundas sintéticas. Como ejemplos de frases con significado analítico o formal, se pueden citar las de la lógica o de las matemáticas, y como ejemplos de frases sintéticas o empíricas cualquiera que se refiera a cualquier hecho; más específicamente, a la descripción de un evento u objeto.

En casos típicos es fácil hacer esta distinción. La siguiente es un ejemplo de frase formal o analítica: "Llamamos transitiva a una relación R cuando, si A guarda dicha relación con B, y B la tiene con C, entonces A también la tiene con respecto a C." En cambio, la frase: "Pedro está sentado en un sillón" es puramente sintética. Pero muchas frases sintéticas encierran elementos analíticos, *e.g.*: "La excitabilidad eléctrica de un nervio disminuye durante la asfixia."

Así, sea obvia o difícil la distinción es útil, porque subraya diferencias importantes en la categoría del lenguaje cognitivo. Estas diferencias también son importantes para el análisis del lenguaje científico. La ciencia estudia hechos concretos; un gran número de sus afirmaciones serán, por lo tanto,

sintéticas. Pero busca relaciones formales entre distintas variables de los fenómenos estudiados; muchas de sus afirmaciones serán, entonces, de carácter analítico.

Después de hacer esta clasificación, enuncian los positivistas lógicos un criterio para atribuir algún significado a una proposición cognitiva empírica. Este criterio fue formulado pragmáticamente por Peirce como sigue: "Una proposición tiene significado empírico cuando, y sólo cuando, la afirmación o la negación de dicha proposición implica una diferencia que puede ser sometida a una prueba experimental." Nótese que el criterio es considerado necesario y suficiente, en el sentido matemático o lógico de la expresión.

En otras palabras, como dice Carnap, lo esencial es que si la proposición contiene uno o varios predicados, estos predicados han de ser observables. Si implican acciones previas a la observación, estas acciones han de ser realizables en principio. El criterio no exige que la proposición sea cierta, es decir, que concuerde con los hechos; puede resultar falsa, y sin embargo, tener significación cognitiva. Por ejemplo, la proposición: "Este lápiz es negro" es significativa aun cuando el lápiz sea azul, ya que se puede llevar a cabo su verificación. En cambio la frase: "El interior de un cuerpo sólido opaco es verde" no tiene significado alguno, ya que la observación convertiría al interior en exterior al tratar de comprobarla.

De los estudios que estamos resumiendo, hay un último resultado que debemos considerar. Tanto Carnap como Feigl, distinguen dentro del lenguaje cognitivo empírico subgrupos independientes: el lenguaje de los datos y el de los conceptos físicos. Las definiciones que dan no son precisas. En términos vagos y generales, el lenguaje de los datos es el que expresa las sensaciones o percepciones directas e inmediatas de los observadores. Este lenguaje de los datos es, en cualquier caso, individual, introspectivo, ya que expresa lo que un observador percibió.

Adquiere, sin embargo, universalidad siempre que haya acuerdo satisfactorio entre diversos observadores.

El lenguaje de los conceptos físicos es más abstracto. Son los conceptos que ejemplifican los autores citados con términos tales como: aceleración, fuerza, gravitación, masa, campo, etcétera.

Nos llevaría demasiado lejos examinar otras sugerencias del círculo vienes. He hecho hincapié en las citadas, porque proporcionan una sistematización del lenguaje que, sea o no acertada, tiene implicaciones importantes para el problema del lenguaje que es apropiado para la ciencia.

Veamos ahora cuál fue la contribución de Bridgman. En su libro *La lógica de la física moderna*, publicado en 1927, hizo un intento de evaluar los principios básicos para la interpretación de la física. Es el estudio de un experimentador versado en su disciplina que busca conocer, con un mínimo de lastre metafísico, como trabajan de hecho los físicos cuando tienen éxito. Algunas de sus conclusiones son las siguientes.

La actitud del hombre de ciencia, tiene que ser necesariamente una actitud de empiricismo. Debe separar la realidad exterior, tema de estudio, de sus procesos mentales. Sus procesos mentales, por otra parte, deben estar subordinados a aquella realidad. Esta actitud puede parecer ingenua desde el punto de vista filosófico, pero es imprescindible para el desarrollo de la ciencia.

Cada nuevo campo de experimentación científica, puede presentar fenómenos radicalmente distintos de los conocidos en otros campos. El investigador debe siempre estar preparado para aceptar que, las nociones teóricas que tiene a mano, pueden fracasar, al ser aplicadas en otro campo. De hecho, esto fue lo que ocurrió en la física, cuando se empezaron a estudiar los fenómenos elementales en la escala del microcosmos, y lo mismo ha ocurrido en numerosas otras ocasiones.

Bridgman distingue en la física: *a)* operaciones experimentales o datos, *b)* conceptos, y *c)* modelos o "construcciones." A los conceptos los divide en físicos y mentales. Su tesis primordial es que estos conceptos sólo son definibles a través de su uso, y se derivan de las operaciones que se llevan a cabo para aplicarlos a cualquier fenómeno. Insiste en que lo importante no es lo que dice el físico a propósito de cualquiera de sus conceptos, sino la forma como los emplea o aplica. El concepto de longitud, por ejemplo, corresponde a la medición de la longitud, y sólo a eso. Así, cualquier concepto sería sinónimo con las operaciones correspondientes que lo determinan. La operación representa lo empírico, el contacto del experimentador con el hecho del mundo exterior. El concepto, representa el elemento racional de la observación, el hecho simbolizado y abstraído. Por último, las construcciones serían entes teóricos elaborados a partir de los conceptos.

Ejemplos de conceptos: longitud, masa, aceleración, fuerza, energía, etcétera.

Ejemplos de construcciones: el campo eléctrico estático o magnético, la reacción de un cuerpo elástico a la deformación, etcétera.

Los conceptos pueden ser físicos o mentales, dependiendo de las operaciones correspondientes que les dieron origen. La significación de un concepto, depende solamente de las operaciones en las cuales se basa. En otras palabras, concepto y operación serían sinónimos. Cuando las operaciones son físicas el concepto será físico. En caso contrario, las operaciones correspondientes serán mentales y, a su vez, el concepto será mental. En muchos casos las operaciones son mixtas y, en realidad, no es posible trazar una línea de demarcación precisa entre los dos grupos de conceptos. Pero esta dificultad no resta méritos a la tesis, ya que lo importante no es el tipo de operaciones realizadas, sino la aseveración que indica que el concepto no tiene otro significado que el que le dan las operaciones que lo determinan, cualquiera que sea la índole de éstas.

En muchas ocasiones, la aplicabilidad de un mismo concepto a distintos fenómenos, requiere operaciones distintas. La justificación del empleo

del mismo término depende de que, en los casos en los cuales se pueden realizar varias de estas distintas operaciones, la concordancia entre los resultados es satisfactoria. Pero, como dice Bridgman, hay que estar preparados para la posibilidad de que, en un momento dado, el concepto pueda dividirse, resultar múltiple en vez de único, precisamente porque corresponde a operaciones distintas.

Consideremos como ejemplo las medidas de las dimensiones en el espacio y en el tiempo. Newton, en los *Principia*, distinguió el tiempo, el espacio, el sitio o lugar, y el movimiento, por una parte en absolutos, verdaderos o matemáticos, y por la otra, en relativos, aparentes y comunes. El tiempo absoluto, dijo, transcurre uniformemente, sin relación con nada externo. Ahora bien, no hay operación posible que permita apreciar este tiempo absoluto, de suerte que podemos decir que éste no existe en la naturaleza. El criterio operacional lo descarta para los usos de la ciencia.

Igual cosa podríamos decir a propósito del espacio absoluto. La longitud sólo podemos definirla a través de los métodos que empleamos para medirla. Estos métodos son distintos para objetos estáticos de dimensiones medias, para objetos o sistemas muy pequeños (microcósmicos) o muy grandes (macrocósmicos), y para objetos que están en movimiento. Para los objetos medianos y estáticos, el método habitual es aplicar una medida patrón y obtener la medida deseada por comparación con ella. Si las dimensiones del objeto son mayores, este método es poco práctico y se recurre a triangulaciones en las cuales, la precisión de la medida final depende de la precisión con la que se puedan medir los ángulos. Cuanto mayor es la dimensión, menor es la precisión en las medidas. La mayor parte de las distancias astronómicas contienen un margen de error muy importante.

A este respecto, es interesante considerar la pregunta de si el espacio real es euclídeo, o no lo es. Gauss trató de demostrar, experimentalmente, que los ángulos de un triángulo terrestre grande sumaban  $180^\circ$ . Llegó a la conclusión de que la divergencia cabía dentro del error de medida. Desde que Michelson hizo sus experimentos, sabemos que si las medidas de Gauss hubieran sido más exactas, su suma no habría sido de  $180^\circ$ , sino mayor o menor dependiendo de la dirección que siguió la luz al recorrer el triángulo, con respecto al sentido de la rotación de la Tierra. Los errores en las medidas de las distancias de astros lejanos son tan grandes, que el problema de si el espacio es euclídeo, en escala astronómica, es puramente académico.

Pasemos al microcosmos. Se dice que un electrón tiene un diámetro de aproximadamente  $10^{-13}$  cm. Esta afirmación guarda muy poca relación con la afirmación semejante de que un objeto dado, mide tantos metros y tantos centímetros. Es que en el caso del electrón las operaciones se realizaron como sigue: se tomaron las soluciones de ciertas ecuaciones matemáticas derivadas de las correspondientes a los campos electrodinámicos, y se sus-

tituyeron datos numéricos en estas ecuaciones, que fueron obtenidas por medidas experimentales, en las cuales no se midieron longitudes. El físico asevera que este método le proporciona la dimensión aproximada del diámetro del electrón, pero esto es porque se han hecho otros experimentos, y hay otras teorías que no muestran inconsistencia alguna al tomar este punto de vista.

La tesis de Bridgman puede extenderse afirmando que las únicas proposiciones que tienen aceptación en el lenguaje científico son aquellas que tienen significación operacional, es decir, aquellas que son susceptibles de confrontación directa o indirecta con los hechos. La importancia de esta afirmación es obvia, ya que puede eliminar decisivamente determinados problemas, catalogándolos como seudocientíficos, y eliminar también a determinados conceptos o modelos. Ya cité el caso de los conceptos de tiempo y de espacio absolutos, enteramente abandonados por los físicos desde que Einstein mostró que el concepto de simultaneidad sólo puede definirse a través de operaciones relativas.

Otro ejemplo clásico en la física es la noción del éter. Fue introducida por Faraday, Maxwell, Hertz y otros, por el prejuicio de la imposibilidad de que hubiera en la naturaleza acción a distancia. Pero las propiedades que había que asignarle al éter fueron tales que no había operación realizable, que permitiera observarlo. Se propusieron un sinnúmero de modelos para el éter, pero todos fallaron porque estaban de antemano condenados al fracaso. Hoy en día, los físicos ya no se preocupan por la existencia del éter, ni discuten ya si es posible o no la acción a distancia. Se limitan a hacer experimentos y teorías realizables, y la física sigue progresando y con marcha acelerada.

El problema del éter es de la misma categoría, que el de establecer cuáles podrían haber sido las intenciones que perseguía Shakespeare cuando escribió su *Hamlet*. Se han escrito muchos estudios muy interesantes sobre este tema, pero no son científicos porque no resisten al criterio del operacionalismo.

Las ideas de Bridgman han tenido repercusión profunda. Han sido duramente criticadas por muchos autores, pero han sido aceptadas con entusiasmo por muchos experimentadores, especialmente en aquellos campos, donde la separación entre lo físico y lo metafísico, lo empírico y lo metempírico, es todavía oscura e incipiente, como sucede con la psicología y con las ciencias sociales. Veamos algunas de las críticas que le han formulado.

El físico Margenau piensa que un criterio operacionalista estricto: *a*) disolvería al Universo en conceptos discretos y aislados, heterogéneos y sin coherencia lógica, *b*) retardaría el desarrollo de la ciencia, dándole énfasis a lo que es más susceptible de cambiar de una a otra épocas, y *c*) haría a los conceptos físicos distintos de otros conceptos, científicos o no.

Otro físico, Lindsay, piensa que la adopción del criterio operacionalista, eliminaría toda la física teórica. Urban, profesor de filosofía en Yale, objeta que la distinción entre las proposiciones cognitivas y las no-cognitivas, es prácticamente inaplicable. Por una parte, dice, todas las ciencias incurren en numerosas proposiciones metafísicas, por ejemplo, la discusión de cualquier organismo en su conjunto, la teoría de la evolución, la segunda ley de la termodinámica, etc. Por otra parte, piensa que no es legítimo negar significación a las proposiciones metafísicas o metempíricas; afirma que aun cuando su significación difiere de la de los asertos confrontables con la realidad, estas últimas proposiciones tienen en común con las otras un valor explicativo: nos ayudan a entender.

Es indudable que muchas de estas críticas son justificadas, especialmente, por lo que se refiere a la falta de precisión en muchas de las nociones empleadas. Sin embargo, la contribución de Bridgman marca una época. Es esencial que el hombre de ciencia se libere de sus prejuicios metempíricos. Es importante que reconozca que sus hechos no sólo son función de la realidad exterior, sino también de las operaciones llevadas a cabo. Es también importante que sepa que estas operaciones, aún las más directas, encierran un componente racional. Más todavía, es importante que sepa que cuando trabajan las manos también trabaja el cerebro. Por último, es sobre todo esencial, que separe los problemas y las teorías susceptibles de un estudio científico de aquellas que no lo son, es decir, que sepa desentenderse de los seudoproblemas y deshacerse de las pseudoexplicaciones.

Lo que Bridgman estudió fue, fundamentalmente, cómo afectan las operaciones a los conceptos. El problema inverso, el de la influencia de los conceptos sobre las operaciones, es un campo de estudio casi virgen. Pienso que la exploración de este campo, debiera producir frutos importantes.

Como hace notar Bentley, la actitud que tomó Bridgman hacia la física, recuerda la que había adoptado mucho antes Pawlow, frente a lo que se puede llamar la psicología de los animales. La secreción "psíquica" de saliva, no difiere de la que ocurre cuando el animal gusta de un alimento apropiado, sino en el empleo del término "psíquico." Pawlow se propuso eliminar en su estudio todos los conceptos no operacionales como diríamos ahora, es decir, los términos psicológicos para la descripción del comportamiento de sus animales. La tarea fue muy ardua, pero se vio coronada por el éxito. Una parte importante de la psicología, entró al acceso de los métodos científicos propiamente dichos, o sea, el de los métodos operacionales.

## *Postulados y axiomas*

Hasta hace relativamente pocos años, se definían los axiomas como proposiciones que contenían asertos que no requerían demostración, por ser evidentes *a priori*. No tan solo no era necesaria una prueba de estas proposiciones, sino que era imposible presentarla, porque los axiomas contenían verdades generales y elementales, a partir de las cuales se creía que era posible deducir un gran número de verdades particulares. Por el contrario, los postulados no tienen el carácter de ser necesariamente evidentes. Son afirmaciones, también no demostrables, en gran parte arbitrarias, adoptadas provisionalmente, pero sujetas a ser desechadas, en cuanto aparecen en contradicción con alguno de los axiomas, o en contradicción con los hechos de observación.

La aceptación de verdades evidentes data de la más remota antigüedad. Tanto la lógica de Aristóteles, como la filosofía de Platón, se basaron en ellas. Mucho después, los imperativos categóricos de Kant encierran la misma idea, de que hay verdades que están por encima de cualquiera discusión; porque la mentalidad humana tiene necesariamente que aceptarlas como obvias. Las ideas de Kant se basaron seguramente en el éxito de la mecánica newtoniana. Parecía cosa natural que en un Universo gobernado rígidamente por leyes de un determinismo estricto, cabía la existencia de leyes o principios básicos inmutables, cuya validez era indudable.

La clarinada que marcó el ocaso de los axiomas, de las verdades evidentes *a priori*, y de los conceptos de aceptación ineludible, fue sonada por

los matemáticos. Y esto ocurrió precisamente en la geometría, la disciplina donde los axiomas habían reinado en forma absoluta, desde que Euclides los había enunciado con precisión, aproximadamente 300 años antes de la Era Cristiana. Entre los postulados de Euclides, es decir, entre sus proposiciones ciertas, pero difíciles de demostrar, está aquel que afirma que si dos rectas son cortadas por una tercera, y si los ángulos interiores entre esta última recta y las dos primeras suman menos de  $180^\circ$ , las dos rectas cortadas se cruzarán a su vez hacia este lado de estos ángulos. El número de publicaciones en las cuales se pretendió demostrar este postulado, es decir, deducirlo de los otros axiomas y postulados, es casi tan grande como el de los ensayos de obtener *perpetuum mobile*, o cuadraturas del círculo. Todos estos ensayos de demostración fracasaron.

La mayor parte de las pruebas, se basaban en el método llamado de reducción al absurdo. El método consiste en mostrar que, la afirmación de la proposición contraria a la que se quiere demostrar, conduce a una contradicción con los otros axiomas o postulados, o con otra proposición ya demostrada a partir de ellos. En ninguno de los intentos de demostrar el postulado de Euclides con este método, se encontró la inconsistencia que se esperaba, pero era tal la fe en la verdad de la geometría de Euclides, que el mismo Gauss, uno de los grandes matemáticos de todas las épocas, no se percató de la implicación trascendente encerrada en esta falta de contradicción. Fueron Lobachevsky en 1826, y Bolyai en 1832, quienes, independientemente, tuvieron la suficiente visión para afirmar que se pueden desarrollar geometrías consistentes, que difieren de la de Euclides, en que no se postula en ellas, que las paralelas se extienden indefinidamente sin cortarse. Existen en la actualidad tres sistemas geométricos: el Hiperbólico de Lobachevsky y Bolyai, el Elíptico de Riemann, y el Parabólico de Euclides. Los tres difieren en su postulado con respecto a las paralelas, y los tres son consistentes.

La filosofía de Kant se basaba en la posibilidad de encontrar verdades absolutas, juicios sintéticos *a priori*, por intuiciones de la razón pura e independientes de cualquier experiencia. Kant citaba a la geometría de Euclides, y en particular a sus axiomas y postulados, como un ejemplo de estas verdades. El descubrimiento de las geometrías no-euclídeas invalidó la tesis de Kant. Ninguna de estas geometrías es más cierta, ni más natural, ni más buena, que las otras. El sistema geométrico que utilice cualquier hombre de ciencia, será aquel que le resulte más cómodo y de aplicación más sencilla. Si para la mayor parte de las teorías científicas actuales es más conveniente la geometría euclídea, no lo es para todas. Einstein encontró que la formulación de la teoría de la relatividad es más natural y sencilla empleando una forma no-euclídea.

La ciencia moderna no acepta axiomas ni verdades absolutas apriorísticas. Acepta, sin embargo, un número importante de postulados, no defi-

nidos a la manera de Euclides, como verdades necesarias aunque no obvias. Estos postulados son definidos como principios sugeridos por la experiencia y aceptados, sin prueba previa, para ser desechados si la experiencia ulterior estuviera en desacuerdo con ellos. Aunque la mayor parte de estos postulados no son formulados explícitamente en las monografías o tratados científicos, un análisis cuidadoso revela su existencia implícita en ellos.

La necesidad de adoptar algunos principios básicos para orientar la investigación científica, aparece desde las épocas tempranas de la ciencia moderna. Los cuatro postulados, formulados por Descartes en su *Discurso sobre el método*, aun cuando no constituyen una lista completa, siguen siendo importantes y, en gran parte, aplicables. Estos postulados son:

1. No aceptar nada que no constituya un conocimiento claramente verificable.
2. Dividir cada problema en partes.
3. Proceder de lo sencillo a lo complejo.
4. Aspirar a ser tan completos como sea posible y a generalizar.

Por otra parte, los principios de Galileo fueron los siguientes:

1. Que existe una correspondencia y armonía absolutas, entre las verdades matemáticas y los eventos naturales.
2. Que, en consecuencia, la actitud teleológica aristotélica, debiera ser sustituida por el concepto de relaciones causales.
3. Que los aspectos no medibles de la naturaleza, no constituyen un tema apropiado para el estudio científico, ya que no son susceptibles de una formulación matemática.
4. Que la justificación lógica de los procedimientos empleados en la investigación empírica, no es necesaria.
5. Que la naturaleza íntima o esencial de las cosas, consideradas como sustancias con atributos, no es del dominio de la ciencia, sino que ésta debe ocuparse de las relaciones que existen entre estas cosas.
6. Que las explicaciones, o teorías científicas, no deben ser finales o absolutas, sino que deben dejar lugar a verificaciones, correlaciones y estudios ulteriores.

Por su parte, Newton, en los *Principia*, dio cuatro reglas de raciocinio para la "filosofía natural:"

1. No debemos aceptar más causas para los eventos naturales, que aquellas que son tanto verdaderas como suficientes para explicar su aparición.
2. Por lo tanto, debemos asignar, siempre que sea posible, las mismas causas a los mismos efectos naturales.
3. Debemos considerar como cualidades universales de todos los objetos, a las cualidades que encontramos que pertenecen a todos los cuerpos

que están al alcance de nuestros experimentos, y que son susceptibles de extensión o reducción a otros cuerpos u objetos.

4. Aunque pueda haber hipótesis alternativas concebibles, debemos aceptar como ciertas, las inducciones hechas a partir de los fenómenos observados, hasta tanto que no se observen otros fenómenos que las puedan hacer más precisas, o que las invaliden.

Podemós resumir los postulados de la ciencia moderna como sigue:

#### FILOSÓFICOS

1. *La existencia de un Universo o realidad exterior: la materia o sustancia de los filósofos.* Este Universo exterior, se manifiesta a través de nuestros órganos de los sentidos. De acuerdo con Galileo, la ciencia no se preocupa de elucubrar acerca de la naturaleza íntima de esta realidad externa; le interesan los atributos y relaciones, no la esencia.

2. *La posibilidad de hacer observaciones, abstracciones y juicios.* A estos atributos podemos llamarlos mentales. Como hice notar antes, la aceptación de estos dos primeros postulados, asigna al hombre de ciencia una filosofía dualista.

3. *La existencia de otras mentalidades independientes.* El solipsismo mental es incompatible con la investigación científica, no sólo porque niega la existencia de una realidad externa independiente de la mente del observador, sino también porque la ciencia requiere de intercambios, de críticas y de repeticiones independientes de experimentos; todos estos requisitos necesariamente implican pluralidad de mentalidades independientes.

#### PERSONALES

1. *La posibilidad de depender de la memoria, propia y ajena.* Los informes científicos encierran siempre afirmaciones, que fueron confiadas a la memoria; y nadie tendría tiempo de repetir todos los experimentos que han hecho otros.

2. *La confianza en la honorabilidad de los hombres de ciencia.* En ocasiones, esta fe se puede ver frustrada, pero la ciencia avanzaría bien poco si cada hombre de ciencia no aceptara sino sus propios resultados.

3. *La fidelidad de los órganos de los sentidos.* No quiero decir con esto que un hombre de ciencia que tenga alguna deficiencia en sus órganos de los sentidos, sólo ha de confiar en lo que él mismo percibe. Tampoco esto significa que los hombres de ciencia, piensan que todos los fenómenos del mundo exterior, deben y pueden impresionar sus órganos de los sentidos. El postulado afirma que las relaciones que establecen los receptores del observador entre el mundo exterior y su mentalidad son, en general, unívocas. Cuando estas relaciones son equívocas hay siempre criterios capaces de eliminar la confusión.

## DE JUICIO O RACIOCINIO

1. *La validez de la lógica.* Este postulado afirma que hay raciocinios legítimos, y que la ciencia debe siempre conformarse a ellos. Como en realidad no existe una lógica absoluta y única, sino que hay varias, y como algunos de los cánones que estas lógicas aceptan son sólo relativos, el hombre de ciencia tendrá que adoptar alguno. De hecho lo adopta y, así, la lógica gobierna todas las deducciones científicas.

2. *La validez de la inducción.* Aun cuando es imposible de justificar lógicamente este método de inferencia.

## SOBRE LA REALIDAD DEL MUNDO EXTERIOR

1. *La existencia de uniformidad o regularidad en la naturaleza.* Esta uniformidad tiene dos aspectos. El primero tiene relación con la permanencia o individualidad de algunos objetos o eventos exteriores. Me refiero a la creencia de quien afirma que la mesa que vio ayer, es la misma que vio hoy, y que verá mañana. El segundo es el que está en relación con la aceptación de la validez de la inducción.

2. *La posibilidad de formular matemáticamente las leyes naturales.* Este es el primer principio de Galileo. En vista de la aceptación del postulado de uniformidad, es casi innecesario citarlo como un nuevo postulado, ya que si las relaciones entre las variables o eventos ocurren con regularidad, siempre será posible formularlas con precisión, es decir, en lenguaje matemático.

3. *La necesidad de poder someter a prueba experimental todas las leyes, hipótesis y teorías.* Esta es una extensión del sexto principio de Galileo, que declara carentes de sentido científico a todas las proposiciones acerca de los hechos, cuando es imposible llevar a cabo alguna operación que las confirme o invalide. Como hace notar Bridgman, las nociones de velocidades o dimensiones absolutas, o la del éter, no pertenecen a la ciencia, ya que no son reducibles a prueba experimental. De la misma manera, la pseudoexplicación de los fenómenos que ocurren en los seres vivos, por la afirmación de que poseen un fluido o atributo vital característico, no es aceptable para la ciencia, ya que nadie ha sugerido todavía algún procedimiento experimental que permita el estudio de este fluido o atributo.

Hay otros principios generales, adoptados por la ciencia, que son, a veces, citados como postulados científicos. Pienso que es preferible separarlos de los anteriores, porque representan, más bien, tendencias o reglas. Por otra parte, es posible desarrollar trabajos científicos sin tener que seguir estos principios.

A) *El principio de simplicidad.* La regla de dar siempre preferencia a la explicación o a la hipótesis más sencilla, es generalmente atribuida a Oc-

cam. En realidad, esta regla es de aplicación común. Cuando en un estudio científico hay que escoger entre dos hipótesis igualmente posibles, pero desigualmente complicadas, seguramente que se prefiere a la más sencilla. Cuando se inicia un estudio, conviene empezar por formular hipótesis sencillas. Es cierto, también, que muchas de las leyes naturales encierran pocos parámetros. La historia de la ciencia, sin embargo, presenta numerosos ejemplos de complicación gradual de las hipótesis, leyes o teorías, que fueron inicialmente sencillas. Esta complicación es requerida por las observaciones, cada vez más cuidadosas y completas, y por las medidas, cada vez más exactas. La simplicidad, además, es siempre relativa. Si estudiamos fenómenos complejos, y no cabe duda que los hay en la naturaleza, no debe sorprendernos que nos veamos obligados a hacer teorías complicadas. No juzgo que el criterio de simplicidad deba ser un criterio, ni decisivo, ni básico, para decidir acerca de la aceptabilidad de una hipótesis o teoría científica.

B) *El principio de las interpretaciones monísticas.* Existe la tendencia a no admitir la posibilidad de que hayan dos explicaciones o teorías distintas e independientes, que sean igualmente válidas para un mismo fenómeno o grupo de fenómenos. Cuando ocurre esta situación, como ha ocurrido en numerosas ocasiones en la historia de la ciencia, se considera importante el buscar hechos que discriminen entre las distintas alternativas, o bien, el averiguar si la independencia no es sólo ficticia, y si los dos puntos de vista son formalmente equivalentes.

C) *El principio de la unidad de la ciencia.* Aun cuando los hombres de ciencia en general trabajan en aislamiento relativo dentro de su campo particular, en ninguna ciencia se aceptan hipótesis o teorías que no sean consistentes con las de las demás ciencias.

D) *El principio de la generalidad.* El deseo de elaborar teorías de aplicabilidad tan grande como sea posible, está íntimamente relacionado con el principio anterior. La mayoría de los hombres de ciencia, considera probable la realización de teorías que sean aplicables a todos los campos de la ciencia. Siendo la física, la que se ocupa de las propiedades y relaciones comunes a todas las entidades del Universo, es natural que los investigadores que se ocupan de fenómenos restringidos, recurran a la física como al paso intermediario para lograr que su teoría logre su incorporación a la ciencia universal, y a su unificación con las demás ciencias. Es obvio que si se ha de lograr alguna vez una ciencia única universal, las teorías de esta ciencia deben tener alcances de una generalidad completa.

Si la ciencia se basa en estos postulados y estos principios, que son explícitamente arbitrarios, es porque no reconoce ninguna verdad absoluta y porque, cuando en su principio aceptó axiomas y verdades obvias a la intuición, su progreso no se vio favorecido, sino dificultado e impedido. Afirmino que estos postulados son arbitrarios. Lo son, pero son inspirados

por la observación empírica, y su arbitrariedad es solamente *ab initio*. Su justificación es pragmática. La ciencia ha tenido, en el curso de su historia, innumerables fracasos. Pero también es cierto que ha tenido, y tiene todavía, muchos éxitos. Nuestra experiencia de todos los días atestigua, sin lugar a dudas, estos éxitos. El espíritu de duda y de crítica que aplica la ciencia a sus leyes y teorías, lo aplica también a sus postulados básicos. Así como basta un solo hecho experimental contradictorio para derribar una teoría, así también bastaría una sola excepción notoria para abandonar alguno de los postulados. Si la ciencia sigue aceptando estos postulados, es porque esta excepción no ha ocurrido todavía. Es evidente que sin estos postulados el estudio científico de la naturaleza no sería posible.

# *La lógica en la ciencia*

## *Inducción, deducción*

La inducción y la deducción son los dos únicos métodos de inferencia que considera la lógica, se distinguen entre sí, en que la primera parte de uno a más casos particulares para establecer un principio general, en tanto que la segunda aplica a uno o más casos particulares un principio general. Son, así, formas opuestas de inferencia, pero son también complementarias. Hay un tercer tipo de inferencia: la intuición, pero ésta no es codificable; en forma un tanto arbitraria se afirma, a partir de determinada experiencia, que algo debe ser cierto. La aseveración puede resultar acertada, o puede resultar falsa, pero la elaboración de la inferencia, por intuición, se hace *de una sola pieza*, sin seguir regla determinada alguna.

La esquematización habitual del razonamiento científico es la siguiente:

*a)* Se realizan una serie de observaciones o experimentos, y si resultan concordantes se induce a partir de ellos una relación funcional entre las variables estudiadas, una ley que expresa esta relación funcional, de preferencia bajo la forma de una ecuación matemática. *b)* A partir de una o más de estas relaciones funcionales, se induce una teoría más abstracta que es aplicable a eventos o fenómenos distintos de aquéllos, a partir de los cuales fue elaborada. *c)* Se deducen las implicaciones de la teoría con respecto a estos nuevos fenómenos. *d)* Se realizan observaciones o experimentos para ver si estas implicaciones deducidas de la teoría, se ven verificadas por los hechos. Se considera: 1. Que mientras mayor sea el número de

observaciones de las cuales se indujeron las primeras leyes y mientras mayor la concordancia entre las leyes y las observaciones, mayor es la probabilidad de que estas leyes sean verdícas. 2. Que si las predicciones deducidas de la teoría son verificadas con una aproximación suficiente, en un número suficiente de casos, la verdad de la teoría queda establecida.

Puesto que la deducción meramente aplica un principio general a un caso particular, es claro que siempre es tautológica, es decir, que dice lo mismo en otra forma. Jamás nos proporciona un conocimiento nuevo. Lo más que puede hacer es convertir en explícito un conocimiento que ya teníamos en forma implícita. Si la deducción no es sino tautología, es evidente que toda creación, toda adquisición de un conocimiento nuevo requiere inducción. Esta afirmación es legítima, pero no resta importancia ni méritos al análisis deductivo. Algo implícito puede no ser obvio. Basta recorrer cualquier capítulo de matemáticas para darse cuenta de este hecho, y para apreciar el interés que hay en hacer explícitas las consecuencias de los principios generales. En la ciencia, las implicaciones de una teoría pueden no ser ostensibles y podrá ser necesario deducirlas para ver el alcance de dicha teoría, y para someterla a pruebas experimentales.

En la lógica, el valor de los métodos deductivos es independiente de la verdad o falsedad de las premisas empleadas. Lo único que se requiere, es que el razonamiento sea legítimo. Esta independencia entre el método lógico y las proposiciones particulares a las cuales se aplica, es especialmente recalcado en la lógica simbólica; aquella en la cual no se recurre a ejemplos específicos, sino que se enuncian las leyes recurriendo a símbolos de dos tipos; unos que representan clases generales de proposiciones, y los otros, relaciones entre estos dos tipos de proposiciones. Este procedimiento será útil e importante para los propósitos de la lógica, pero en la ciencia, las únicas proposiciones que nos interesan no son proposiciones formales o genéricas, sino que son siempre proposiciones específicas, aplicables a determinado aspecto del Universo. Por otra parte, el interés primordial de la ciencia es el de saber si estas proposiciones son verdaderas o falsas, o sea, si concuerdan, o no, con los fenómenos naturales a los cuales son aplicables.

Ahora bien, cualquier deducción requiere el empleo de una proposición universal, en alguna de las premisas. La lógica considera como proposiciones universales, aquellas en las cuales el predicado es aplicable a todos los miembros de una enumeración finita y completa. El empleo de universales de este tipo para hacer deducciones es, rara vez o nunca, de interés para la ciencia, porque la tautología de la deducción es casi invariablemente obvia. Por ejemplo, si hago el siguiente silogismo: todos los días de la semana tienen 24 hs., el miércoles es un día de la semana, luego el miércoles tiene 24 hs. Habré, así, hecho un razonamiento impecable, pero no habré dicho nada de interés para nadie. Con este tipo de inferencias, la contribución al desarrollo del conocimiento sería nula.

Haciendo a un lado los casos en los que la universalidad de la premisa general, es aplicable a una enumeración finita y completa, cualquiera otra proposición universal no es obtenible, sino por inducción. La validez de la conclusión no dependerá tan sólo de que el razonamiento deductivo, se haya ajustado a los cánones de la lógica, dependerá también de la validez de la inducción original. Consideremos, por ejemplo, el muy trillado silogismo en *bárbara*: todos los hombres son mortales. Pedro es hombre, luego Pedro es mortal. El razonamiento es otra vez impecable, pero Pedro será mortal siempre y cuando *todos* los hombres sean fatal e indefectiblemente mortales, como es lo afirmado por la premisa mayor. Esta premisa es una generalización, una inducción, hecha a partir de un gran número de observaciones incontrovertibles. De hecho, sin embargo, hay muchos biólogos que piensan que quizá la muerte no es ineludible, que cuando se entiendan mejor los mecanismos que conducen a la degeneración gradual de los tejidos pasada cierta edad, será posible que se encuentre que algunos de estos mecanismos, o todos, son controlables y eludibles. Tal vez, entonces, será posible prorrogar indefinidamente la muerte de algunos de los organismos, a los cuales se refiere la premisa mayor.

Consideremos ahora la validez lógica de la inducción como método de inferencia. Es interesante señalar que la incorporación de la inducción a la lógica data del Renacimiento, es decir, del momento en el cual los hombres de ciencia, oponiéndose a las ideas aristotélicas, comenzaron a hacer inducciones (Aristóteles no las había consagrado como legítimas). La única ciencia posible de acuerdo con la lógica deductiva de Aristóteles, era la ciencia de tipo puramente racionalista, construida con universales de Platón.

En realidad, estos universales eran inductivos, pero la inducción no era crítica, y estaba únicamente a la merced de las preferencias, o de la intuición, del inductor.

Durante el Renacimiento, con el desarrollo del método experimental, la inducción dejó de ser para la ciencia un deporte no reglamentado, ya que fue puesta al arbitrio implacable de la realidad, de los hechos. Entonces, empezaron a preocuparse los lógicos en reglamentar la inducción, y los hombres de ciencia, por su parte, pensaron que la inducción era la única manera de alcanzar una generalización empírica. De aquí la importancia de discutir la validez de los métodos inductivos, en plural, porque hay varios, que difieren cualitativamente.

El primero, ya era el único que aceptaba Aristóteles, es el llamado de la inducción perfecta, o de la enumeración completa. Estriba en cerciorarse que cada uno de los miembros de una clase finita, poseen determinado atributo, y después, afirmar tal atributo para toda la clase. Este método es, rara vez o nunca, aplicable a los problema de la ciencia. Por ejemplo, decir que todas las semanas tienen siete días, porque las semanas observadas los tienen, no es ir más allá de lo observado.

El segundo método de inducción, es el de la inducción matemática. En una serie, o clase de términos o funciones, que poseen uniformidades rigurosas, si se demuestra por deducción que si alguna de las propiedades es cierta para el índice  $n$ , también lo es para el índice  $n + 1$ , y si se comprueba que esta propiedad es cierta para un índice bajo fijo  $a$ , se induce que es cierta para *todos* los índices superiores a  $a$ , en número ilimitado. Este tipo de inducción consiste en condensar un número indefinido de deducciones (de  $n$ , a  $n + 1$ ). Es legítima, porque las premisas de cada deducción tienen, forzosamente, que guardar relaciones formales *idénticas*, ya que los elementos o funciones en cuestión son creaciones humanas rigurosamente definidas.

La inducción matemática no tiene aplicaciones sino en el aspecto formal de la ciencia, pero no en el empírico. No puede conducir al establecimiento de leyes naturales. Porque los entes con los cuales trabaja el hombre de ciencia, a diferencia de los del matemático, no son creación suya, y tampoco poseen propiedades rigurosamente definibles e idénticas.

Los dos métodos restantes de la inducción son considerados, en general, como uno solo. Presentan, sin embargo, diferencias cualitativas y serán discutidos por separado. A uno voy a llamarlo estadístico y al otro determinista.

La inducción estadística es la que emplean las compañías de seguros y es, también, aplicable a los juegos de azar. En determinadas circunstancias se emplea también en las ciencias. Consiste en examinar la frecuencia con la que ocurre determinado fenómeno en una serie de observaciones, y en asignar una probabilidad para la aparición del fenómeno en observaciones subsecuentes. El número de casos positivos, dividido por el número total de observaciones, es la medida de esta probabilidad, que varía entre 0 y 1. Si es menor que 0.5, el fenómeno es improbable; si mayor, es probable; si es 0, es imposible; si es 1, es seguro.

Muchas aseveraciones empíricas, aceptadas como verdades indiscutibles, están basadas en este método. Consideremos la premisa mayor del silogismo citado anteriormente. "Todos los hombres son mortales." Esta premisa es aceptada como universal porque, pese a la leyenda del judío errante, no hay hasta la fecha ningún caso auténtico de algún individuo que haya vivido más de 200 años. De acuerdo con el criterio señalado antes, la probabilidad de esta proposición es 1, es decir, constituye una certidumbre.

Si aplicáramos este tipo de inducción empírica a problemas matemáticos hallaríamos que contrasta francamente con la inducción matemática descrita previamente. Veamos algunos ejemplos.

Considérense los siguientes números: 5, 15, 35, 45, 65, 95. Cada número termina en 5, y es divisible por 5; podemos inducir que todos los números que terminan en 5 son divisibles por 5, lo cual será rigurosamente cierto, ya que se puede demostrar por otros métodos. Si aplicamos el mismo criterio a otra serie de números: 7, 17, 37, 47, 67, 97, encontramos que

todos los números terminan en 7 y son primos; podríamos inducir, mediante este criterio, que todos los números que terminan en 7 son primos, lo cual sería falso.

Un ejemplo famoso de inducción del tipo que nos ocupa, es el que se refiere a la llamada hipótesis de Goldbach. En una carta que escribió a Euler, en 1742, hace la observación que todos los números pares que había ensayado, con excepción del número 2, que es primo, podían ser representados, como la suma de dos números primos. Por ejemplo  $4 = 2 + 2$ ,  $6 = 3 + 3$ ,  $8 = 5 + 3$ ,  $16 = 13 + 3$ ,  $18 = 11 + 7$ ,  $20 = 13 + 7 \dots$  Todos los casos ensayados hasta ahora han dado resultados satisfactorios, pero los matemáticos jamás se conforman con un tipo de prueba que es esencialmente empírico, de tal manera que la afirmación de Goldbach sólo es aceptada como una hipótesis. Las únicas posibilidades de prueba que se han encontrado son: un teorema de Schirelmann, que demuestra que todo número entero positivo, puede ser representado por la suma de no más de 300 000 números primos. Hay otra, la de Vinogradoff, que demuestra que los números suficientemente grandes, pueden ser representados por la suma de no más de 4 números primos.

Si la inducción, aplicada a un material tan homogéneo como lo es el de los números, puede conducir a error, es obvio que la probabilidad de error será mucho mayor cuando es aplicada a los eventos naturales. La mera frecuencia de aparición de un fenómeno, no basta para asignarle una probabilidad. Aún en los casos simples, se exige que esta probabilidad tienda a un límite, es decir, que el quebrado  $n/N$ , en el cual  $n$  representa el número de casos positivos, y  $N$  el total de las observaciones tienda a un valor fijo cuando  $N$  aumente. Considérese, por ejemplo, el caso sencillo de la probabilidad de que aparezca el águila en una moneda que cae después de tirada al aire. Si el número de tiros es pequeño, el quebrado  $n/N$  fluctuará importantemente en la mayor parte de los casos. Se supone que conforme aumente el número de tiros ( $N$ ), el valor de este quebrado oscilará alrededor de una media, con fluctuaciones cada vez menores, y que tenderá a este valor medio como un límite.

Correspondió a Hume mostrar, en forma incontrovertible, que el tipo de inferencia que nos ocupa no tiene absolutamente ninguna validez lógica. Ni siquiera en los casos en los cuales el fenómeno observado, ocurre sin excepción. No hay ningún argumento racional para sostener que, por el hecho de que algo ha ocurrido mil a diez mil veces sucesivas, ocurra en la próxima observación y en las subsecuentes. Consideremos el caso de los cristales de glicerol. Antes del año de 1867, el glicerol había sido enfriado en numerosísimas ocasiones, sin que se observara su cristalización. Se podría haber inducido que este compuesto es incapaz de cristalizar. Pero ese año, por circunstancias que todavía no han sido aclaradas, aparecieron cristales en un barril lleno de glicerol. En consecuencia, la inducción anterior fue mostrada falsa.

Lo que caracteriza al método que he llamado estadístico es la búsqueda de correlaciones entre variables o entre eventos, sin hacer ninguna suposición acerca de las relaciones que puedan guardar entre sí estas variables o eventos. El problema es, puramente, el de la frecuencia de aparición, o de concordancia. Podrá suponerse, en muchos casos, que la relación entre las variables consideradas es determinista, pero esta suposición no va a desempeñar ningún papel significativo en la inferencia final. Por ejemplo, si se busca el porcentaje de individuos que mueren a consecuencia de la fiebre tifoidea, lo importante es el valor numérico de este porcentaje, y no el mecanismo o mecanismos que conducen a la muerte en esos casos.

Por el contrario, en el cuarto tipo de inducciones, las relaciones funcionales entre las variables de estudio, desempeñan un papel primordial. Se postula que existe una relación rigurosa entre ellas (hipótesis de trabajo) y después se busca, si este postulado concuerda con los hechos. En estos casos nos encontramos ya, de lleno, dentro del método experimental.

Se piensa, a menudo, que la repetición de los experimentos con resultados positivos confiere, cada vez, mayor probabilidad a la inducción que se planteó como hipótesis inicial. Desde el punto de vista de la lógica, esto no es exacto. La crítica de Hume es, de nuevo, aplicable. En realidad tienen mucho más valor demostrativo los resultados negativos que los positivos. Si se tuviera la seguridad de estar trabajando en un sistema que contenga un número finito de variables pertinentes, todas conocidas y controlables. Si se tuviera, además, la seguridad de poder enumerar todas las relaciones posibles entre estas variables, entonces, los resultados negativos eliminarían una a una las falsas relaciones, no quedando, al final, sino la verdadera.

Por ejemplo, queremos decidir la naturaleza del mecanismo por el cual un impulso nervioso, que recorre una fibra motora, activa a los elementos musculares a los cuales se distribuye esta fibra. Se conocen diversos cambios, físicos y químicos, que ocurren en la fibra nerviosa cuando un impulso se propaga a lo largo de ella. Podemos postular que alguno o algunos de estos cambios deberán ser el factor, o los factores, que evoquen la respuesta del músculo. No son necesarios muchos experimentos para mostrar que el único factor, cuya presencia es indispensable para que el impulso nervioso active al músculo, es la liberación de acetilcolina en la terminal de la fibra nerviosa. Podemos hacer variar los demás factores dentro de márgenes amplios sin que se modifique la respuesta muscular. Por el contrario, si hacemos variar la cantidad de acetilcolina que es liberada, a la llegada del impulso a la terminal, las respuestas musculares se verán profundamente modificadas, aumentando cuando aumenta la cantidad de acetilcolina liberada, y pudiendo desaparecer cuando esta liberación está suficientemente reducida.

En este ejemplo, la conclusión de que la acetilcolina es el factor decisivo en la transmisión de los impulsos en la fibra motora, se hizo por eliminación de los otros factores, es decir, esencialmente por evidencia negativa;

los datos positivos son relativamente secundarios. El número de experimentos no confiere mayor o menor probabilidad a la inducción final. Si el sistema es determinista, si se conocen todas las variables importantes, si se puede mostrar que todas estas variables, menos una, no son necesarias para la transmisión, la que queda, necesariamente, será el factor importante. En principio, en estas condiciones, bastaría una sola observación decisiva, para eliminar a cada uno de los factores no decisivos. En la realidad, ningún fisiólogo estaría satisfecho con hacer este mínimo de experimentos. De hecho, hace varios de cada uno de los tipos posibles, y es muy probable que, en cada serie, observe un determinado porcentaje de casos que no concuerdan con el resto. La razón es que probablemente nunca se puede estar seguro de que se conocen todas las variables pertinentes, y que tampoco se conocen todas las relaciones funcionales posibles entre ellas. En el estado actual de nuestros conocimientos, la hipótesis que asigna a la acetilcolina el papel de agente transmisor de los impulsos motores, concuerda satisfactoriamente con los hechos experimentales. Cabe la posibilidad, sin embargo, de que algún día se encuentre que existe otra señal de la llegada del impulso nervioso al músculo y que esta señal sea el agente transmisor exclusivo, o bien, que concorra con la acetilcolina para determinar la respuesta de la fibra muscular.

Cuando digo que deben repetirse los experimentos, no quiero decir que convenga hacer un gran número de observaciones similares. Lo que debe preferirse es el hacer variar las condiciones experimentales en cada vez procurando mantener constante el factor particular, cuya influencia se quiere investigar, o controlando lo más posible sus variaciones. Si existen tres condiciones experimentales distintas, *a*, *b*, y *c*, para explorar una relación determinada, será de mayor valor para el fisiólogo el realizar  $4a$ ,  $4b$ , y  $4c$ , en vez de  $12a$ . La variación de las condiciones experimentales o de los métodos de medida, elimina los errores sistemáticos, y además, aporta argumentos negativos de eliminación. Si las condiciones que distinguen a *a*, *b*, y *c*, respectivamente, no impiden la aparición de un fenómeno, será claro que esas condiciones no son importantes para el desarrollo del fenómeno en estudio.

Nótese la gran diferencia que existe entre este método y el anterior. En el primero, como ya dije, el determinismo de los fenómenos estudiados era secundario. En este último, por el contrario, el determinismo es la base sobre la cual descansa la inducción.

Se han hecho numerosos intentos para asignar alguna medida a la probabilidad de las inducciones obtenidas por estos métodos. No sería posible discutirlos en detalle. Baste decir, que hay un acuerdo general en aceptar que estos intentos han fracasado. Uno de los últimos intentos, y posiblemente uno de los más competentes, es el de Reichenbach, el problema que este autor abordó fue, el de la probabilidad de que una teoría o hipótesis sea cierta. El consideró que existe una probabilidad, *a priori*, para cual-

quier hipótesis, solamente por el hecho de pertenecer a determinada clase o tipo. Una vez que se hayan realizado algunos experimentos, la medida de la probabilidad sería el número de casos positivos, dividido por el número total de proposiciones verificables que compliquen a la teoría. Al analizar este argumento, inmediatamente tropezamos con la dificultad de asignar un valor a la probabilidad *a priori*, y otra dificultad, aún mayor, de fijar el número total de predicciones de la teoría. Este número, para una buena teoría, tendría que ser indefinidamente grande. Sin entrar en detalles, el procedimiento de Reichenbach pide que se multipliquen las probabilidades que corresponden a cada serie de experimentos, de manera de obtener la probabilidad total de la teoría. Ahora bien, estas probabilidades parciales, son quebrados con valor menor que 1. De suerte que, cada vez que se realiza una serie de experimentos, aun cuando sean satisfactorios para el hombre de ciencia, la probabilidad de la teoría tenderá, necesariamente, a disminuir.

El error de Reichenbach estriba en pensar que el hombre de ciencia busca probabilidades a sus teorías. Una teoría científica se enuncia rigurosamente. Es cierta, o es falsa, no probable o improbable. Es cierta, si concuerda satisfactoriamente, es decir, con un margen de error adecuado, con los hechos a los cuales es aplicable; es falsa cuando esta concordancia no existe. El hombre de ciencia la seguirá considerando cierta siempre que sus predicciones se vean confirmadas. En el momento en que alguna de esas predicciones no se ve realizada, no simplemente le reduce probabilidad a su teoría, sino que la declara falsa y, o la modifica, o busca una nueva. Esto sucede no sólo con las teorías que incorporan leyes deterministas rígidas, sin excepción, sino también con las que enuncian probabilidades. La afirmación de la probabilidad debe ser rigurosa. Por ejemplo, se podrá decir que, en determinadas condiciones experimentales, un fenómeno aparecerá en el 70 por ciento  $\pm 1$  de los casos, pero la afirmación es categórica. La probabilidad de esta afirmación es 1.

La imposibilidad de justificar lógicamente a la inducción empírica, se hace aparente por las siguientes consideraciones: si nuestro argumento, para esta justificación, es inductivo, será necesariamente circular y, por lo tanto, no válido. Si es deductivo, tendremos que emplear alguna o algunas proposiciones universales, que no sean enumeraciones, y que no sean puramente formales, sino que tengan un contenido empírico. Pero este tipo de proposiciones sólo puede ser obtenido por inducción y, por lo tanto, nuestro argumento será, otra vez circular. El problema de la inducción empírica no es ni puede ser un problema lógico, puesto que la lógica no se ocupa sino de relaciones formales. Es, pues, un problema en el cual no podemos descartar el significado empírico de las proposiciones y la validez empírica de los métodos.

Así llegamos a la conclusión de que las inducciones científicas no tienen validez lógica, y que, ni siquiera, es posible asignarles determinado grado

de probabilidad. Las inducciones más importantes son las del cuarto tipo, las que se basan en el postulado de un determinismo. Si se pudieran justificar lógicamente las aplicabilidades de este determinismo, se podría deducir la validez de las inferencias. Pero la ciencia afirma la existencia de regularidades en la naturaleza mediante una nueva inducción.

El argumento es como sigue: supongamos que un fenómeno obedece a *alguna* ley rigurosa. Formulamos *una* ley que nos parece plausible. La comparamos con los hechos. Supongamos que encontramos una concordancia satisfactoria, es decir, que quede dentro de los márgenes de error que les podemos asignar a nuestras medidas. Entonces inducimos la ley. De este modo, como ya hemos logrado inducir varias leyes que concuerdan con la realidad, inducimos que los fenómenos naturales siguen leyes rigurosas, es decir, que el Universo es determinista.

Este argumento no es lógico. Su base, o justificación, es su éxito en la práctica. Aplicando leyes inducidas, e induciendo que estas leyes son invariantes en el tiempo, se han logrado innumerables concordancias con los fenómenos naturales, y se ha hecho que progrese la ciencia. Conviene subrayar, sin embargo, que cualquier ley particular está siempre en entredicho. Se la acepta como cierta hasta que sea mostrada falsa, pero entonces, se la descarta y se procede a construir otra que concuerde con todos los hechos anteriores, como lo hacía la ley desechada, pero que además concuerde con aquellos en los que falló la primera.

Las inducciones de la ciencia son posibles porque los fenómenos naturales ocurren con uniformidad. Si alguna vez cambiaran radicalmente algunos de los hechos observados hasta ahora, la ciencia modificaría sus teorías con el fin de incluir los nuevos fenómenos. Si los cambios ocurrieran en todos los terrenos, en una forma absolutamente caótica, o sea, si alguna vez dejaran de encontrarse uniformidades en la naturaleza, la ciencia no sería posible, porque ya no sería posible la inducción.

El principio de la inducción en la ciencia, no es, en suma, sino una prescripción operacional que puede expresarse como sigue: búsquense uniformidades en la naturaleza. Cuando se considere haberlas encontrado, indúzcase, es decir, hágase una generalización (la más sencilla o la menos complicada posible). Véanse las implicaciones de esta generalización y pruébense experimentalmente. Mientras mayor sea el número de predicciones independientes que se verifique, mayor la seguridad con la cual puede aceptarse la inducción. En el momento en que una serie de observaciones correctas no verifique alguna de las implicaciones, abandónese la inducción primera y hágase una nueva que, a su vez, será sometida a la verificación experimental.

# *El principio de causalidad*

## *La teleología*

La noción de causa y efecto es una noción antropomórfica que se derivó de los conceptos de fuerza y acción, cuando las fuerzas no habían sido definidas con precisión por la física, y el modelo de una fuerza era, todavía, la que empleó Sansón para derribar el templo de los filisteos.

La gran mayoría de los filósofos ha pensado, y aún lo sigue pensando, que la noción de causalidad es indispensable para la ciencia y que, precisamente, uno de los objetivos más importantes que persigue la ciencia, es el de encontrar causas para los fenómenos y establecer relaciones causales entre unos fenómenos o eventos, y otros. Por este motivo, los filósofos han buscado expresiones de lo que piensan que es, o debe ser, el principio de causalidad. A título de ejemplos se pueden citar las siguientes:

El diccionario filosófico de Baldwin propone tres:

1. *Causalidad*. Es la conexión necesaria de eventos en la serie del tiempo. Como hace notar Russell en su primoroso estudio, "La noción de la causalidad," esta definición es oscura, incompleta e inexacta. Para darle algún sentido, habría que formularla como sigue: dado un evento  $e_1$  existe otro evento  $e^2$  y un intervalo de tiempo  $t$  tales que cuando ocurre  $e^1$ ,  $e^2$  le sigue, pasado el intervalo de tiempo  $t$ .

2. *Efecto*. Todo lo que puede incluirse en el pensamiento, juicio o percepción de un proceso, como habiendo ocurrido a consecuencia de otro proceso que sería la causa. Russell señala que esta definición es subjetiva,

y por lo tanto, mala. Dice, además, que es circular, ya que el término *consecuencia* implica la noción de causalidad.

3. *Causa y efecto*. Términos correlativos que denotan dos cosas, fases o aspectos distinguibles de la realidad relacionados en tal forma, que siempre que termina de existir el primero, empieza inmediatamente a existir el segundo, y siempre que empieza a existir el segundo, el primero cesó de existir inmediatamente antes. El término *inmediatamente* no es susceptible de una definición exacta, ya que la serie del tiempo es compacta. Además, como señala Russell, el primer evento tiene necesariamente alguna duración, y pueden presentarse dos eventualidades: o bien este primer evento no cambia durante su duración, o bien está cambiando en alguna o algunas de sus características. Si no cambia, ¿por qué es que a un momento dado surge repentinamente el segundo evento? Si la causa está cambiando, habría que subdividirla, entonces, en una secuencia causal continua, pero entonces ¿cuál es la causa? ¿Es el último estado de este primer evento, es decir, el que precede instantáneamente al efecto? Y, entonces, ¿cuál es el papel de los estados anteriores de la causa, por lo que se refiere al efecto?

Por su parte, John Stewart Mill sugirió la siguiente definición: "La ley de la causalidad es la sucesión invariable, que se encuentra por observación entre cualquier hecho natural y algún otro que le precedió."

Esta proposición es vaga. Si procuramos precisarla nos quedará como único criterio riguroso el de la "observación de sucesiones invariables." Como hizo notar Hume, si adoptamos este criterio para la causalidad, debemos concluir que la noche causa al día, y el día a la noche, ya que ésta es, quizá, la sucesión más regular y constante que podemos observar. Ahora bien, la gran mayoría o todos los hombres de ciencia y los filósofos, se rehusarían a aceptar una relación causal entre la noche y el día, o entre las cuatro estaciones del año que, tomadas sucesivamente, son semejantes.

La actitud de Kant con respecto al principio de causalidad es, todavía, menos aceptable que las mencionadas antes. En la primera edición de su *Crítica de la razón pura*, dijo: "Todo lo que ocurre (o empieza a existir) supone algo previo a lo cual sigue, según una regla."

Esta afirmación encierra dos proposiciones. La primera se limita a establecer que el Universo no tuvo principio (pensamiento que no es pertinente al problema que nos ocupa). La segunda, asevera la existencia de reglas en las sucesiones de eventos. Pero, en tanto que Kant no precisa estas reglas, o su naturaleza y alcance epistemológico, su proposición simplemente afirma que la causalidad existe, pero no la caracteriza.

En la segunda edición de la misma obra, dijo Kant: "Todos los cambios (del Universo) ocurren, siguiendo a la ley de las causas y los efectos." Aquí, nuevamente, Kant afirma que existe una ley universal de causalidad, sin decirnos cuál es esa ley ni cómo debemos interpretarla.

La noción de causalidad ha sido ruda y sabiamente criticada por Hume y por Russell. De estas críticas se desprende claramente, que no es posible

hacer una formulación de un principio de causalidad que signifique algo preciso, o que no sea circular. Cada vez que se emplean las expresiones "algo *ocasiona* o *determina* a algo," o bien, "algo va seguido *necesariamente* de algo," se presupone la noción de causa.

Por otra parte, la separación en el tiempo de las causas y los efectos, es necesariamente arbitraria. La serie del tiempo es compacta y continua. Los cambios en la naturaleza no son instantáneos, sino que denotan procesos. Si al observar el curso temporal de una fracción del Universo, seleccionamos el estado en que se encuentra en determinado instante, y lo comparamos con aquél en que se observa en otro instante, anterior o posterior, debemos reconocer que esta selección es arbitraria. La selección de una causa y del efecto correspondiente, requiere la selección de dos estados diferentes de un sistema en dos instantes distintos; requiere, por lo tanto, una separación en el tiempo entre la causa y el efecto. Pero en cuanto singularizamos dos instantes distintos de un proceso, tenemos que admitir la interferencia posible de una influencia extraña, que se ejercería en el intervalo que separa estos dos instantes, y que podría modificar al segundo estado, el efecto. En consecuencia, la afirmación de que un estado *C* de un sistema va necesariamente seguido, pasado un intervalo de tiempo *t*, de un estado *E*, es insostenible. Y, como dos estados distintos, *C* y *E*, no pueden ser rigurosamente contiguos en el tiempo, es decir, como el intervalo *t* no puede tomarse como igual a cero, la afirmación de sucesiones necesarias es inadmisibile.

La noción filosófica de la causalidad contiene dos conceptos independientes. En el primero se afirma que la existencia de  $e_1$  determina la aparición de  $e_2$ , que  $e_2$  no hubiera existido si  $e_1$  no lo hubiera precedido. El análisis anterior nos muestra que esta afirmación es esencialmente vaga y que no es sometible a un examen o prueba experimental, es decir, que no tiene sentido desde el punto de vista del operacionalismo. El segundo concepto que, insisto, es independiente del primero, afirma que  $e_1$  *siempre* va seguido de  $e_2$ , o en algunas de las formulaciones de este principio, dice que  $e_2$  *siempre* va precedido por  $e_1$ . Tomadas al pie de la letra, estas afirmaciones son falsas, es decir, que la observación no las confirma en todos los casos. Si tomo a  $e_2$  como la muerte de un hombre, no es cierto que esta muerte siempre vaya precedida de un balazo en el corazón; a veces seguirá a una caída desde un quinto piso, otras a una endocarditis lenta maligna, o a muchas otras  $e_1$ 's. Por otra parte, si tomo a  $e_1$  como una fiebre tifoidea, no es cierto que siempre vaya seguida de la muerte del paciente dentro de un plazo corto determinado. Estoy empleando estos ejemplos, de acuerdo con el hecho que los certificados de defunción piden que el médico especifique las "causas" de la muerte.

Como fue señalado al principio, la gran mayoría de los filósofos suponen que la ciencia postula y utiliza el principio de causalidad. La crítica

severa que hizo Bergson del método científico, se basó precisamente en esta suposición. Pero el hecho es que la ciencia ni supone un nexo causal entre eventos sucesivos, ni se preocupa por buscar un nexo de esta naturaleza. Los términos causa y efecto, son empleados ocasionalmente en las publicaciones científicas, pero son mencionadas, generalmente, en las locuciones populares, esencialmente no técnicas, que utiliza el autor mezcladas con los términos científicos precisos. La noción popular de causa, de concatenación necesaria, ha tenido y puede tener todavía alguna influencia en el desarrollo de alguna ciencia o en el estudio de algún problema, pero es sólo en las etapas crudas y titubeantes, o sea, las que corresponden a un conocimiento en la fase rudimentaria. En cuanto una ciencia, o el conocimiento científico de un problema, alcanza madurez, la noción de causa desaparece y jamás vuelve a reaparecer. La ciencia no usa estas interpretaciones de las relaciones causales. Las sustituye por *leyes* que expresan relaciones funcionales entre las variables. Muchas de éstas leyes son *simétricas*, y la noción de causa es en ellas, inaplicable. Por ejemplo:  $PV = RT$ .

Consideremos, como otro ejemplo, la ley de Ohm:  $I = V/R$ . Si mantenemos la resistencia constante, y aumentamos la diferencia de potencial, la corriente aumentará, y podríamos pensar que los cambios de potencial causan los cambios de la corriente. Pero si, otra vez, manteniendo la resistencia constante, aumentamos la corriente, la diferencia de potencial aumentará, y ahora será la corriente, que antes era el efecto, la que aparecerá como causa de los cambios de voltaje. Es evidente que la noción de causalidad, es absolutamente inaplicable a las relaciones simétricas de este tipo.

No todas las leyes formuladas por la ciencia para los fenómenos naturales son simétricas. En cualquier proceso hay una asimetría en el tiempo, que está impuesta por la segunda ley de la termodinámica, por el principio de Carnot-Clausius. Esta ley afirma, que la entropía del Universo tiende siempre a aumentar: 1. No hay trabajo, si no hay una diferencia de potencial (Carnot). 2. La distribución uniforme de la energía, es más probable que la distribución heterogénea. 3. El orden es menos probable que el desorden. Los cambios de energía en un sistema aislado, tienden siempre a igualar los desniveles de potencial del sistema. Cuando ya no haya diferencia de potencial, el sistema ya no presentará cambios. La segunda ley de la termodinámica, es uno de los grandes principios del determinismo científico. Este principio es muy abstracto en sus términos, porque es de aplicabilidad universal. Posiblemente no han recurrido a él los filósofos por su abstracción, y por ser un principio estadístico de probabilidad, no una afirmación categórica de la sucesión de eventos específicos y concretos.

Decir que en un sistema cerrado la distribución uniforme de la energía es más probable que su distribución heterogénea, dista mucho de la otra afirmación que expresa que, determinado evento  $e_1$  va siempre seguido de otro  $e_2$ . El segundo aserto es quizá, más dramático y satisfactorio, pero es, en general, falso; el primero es universalmente cierto.

Cuando Galileo enunció las leyes de la caída de los cuerpos, dijo: "Ya no me parece conveniente investigar la *causa* de la aceleración, lo que me parece importante es estudiar las leyes de este fenómeno." Por su parte, Newton expresó: "Hasta ahora no he podido descubrir la *causa* de la gravedad, y no quisiera ponerme a construir hipótesis; me basta afirmar que la gravedad existe y que obedece las leyes que he formulado, y ella me explica los movimientos de los astros, y la ocurrencia de las mareas."

El principio general que utiliza la ciencia, es el de la "uniformidad de la naturaleza." Como quedó dicho anteriormente (ver pág. 48), las inducciones que conducen a las leyes científicas, postulan la existencia de relaciones funcionales invariantes entre los fenómenos observados. Esto puede ser expresado con precisión, diciendo que el tiempo no aparece explícitamente en las ecuaciones diferenciales que expresan las leyes científicas, o sea, que si determinada función del tiempo  $f(t)$  es una solución de alguna de estas ecuaciones, la función  $f(t-t_0)$  también es una solución. En otras palabras, esto equivale a decir que si la ley es aplicable hoy, también lo fue ayer (si  $t_0$  es igual a 24 horas). A un sistema que obedezca leyes de este tipo, se le puede llamar un sistema determinístico o causal; el término que se emplee no tiene importancia, siempre que se aplique la definición precisa que hemos señalado.

Este principio de la invariancia de las leyes científicas, no es una "verdad evidente *a priori*," ni es una "necesidad del pensamiento" ni es un "imperativo categórico," es sólo una inducción empírica que parte de las leyes mismas, leyes que, a su vez, son inducciones empíricas. Como hace notar Russell, el principio de uniformidad (no el de causalidad), afirma que las leyes naturales son permanentes. El determinismo que esto implica, no es unidireccional o irreversible: el futuro determina al pasado, al igual que el pasado determina al futuro.

Sin embargo, hay que hacer notar que la noción newtoniana-laplaciana de que: "*Todo* el pasado determina a *todo* el futuro," era demasiado amplia. La ha sustituido una noción más modesta, probabilista, aplicable a sistemas aislados, a fragmentos, no al todo. Además, el nexo causal ha desaparecido. El indeterminismo de la física moderna no depende tan sólo de la imposibilidad, como señaló Heisenberg, de determinar con precisión tanto la posición como el momento de las partículas, sino que también depende del hecho que muchas de las teorías actuales son estadísticas, y fijan sólo probabilidades.

Una discusión del principio de causalidad no sería completa, sin la consideración de la teleología. Tradicionalmente, se considera como teleológico, a una proposición o a un argumento que propone como causas de un evento o fenómeno, a otro fenómeno o evento posterior en el tiempo. Por extensión, se interpretan también como teleológicos a los argumentos que atribuyen un propósito futuro a un acontecimiento actual. En realidad,

dudo que sean numerosos los casos, en los cuales alguien haya afirmado explícitamente que un efecto fue anterior a su causa.

Cuando Galileo substituyó la *vis a tergo* de Aristóteles por la inercia, e introdujo en la física un determinismo orientado hacia el futuro, negó el papel de las entelequias y afirmó que el futuro, no puede operar sobre el presente o sobre el pasado. En los siglos que han transcurrido, desde el Renacimiento, el determinismo ha ido ganando más y más terreno a la teleología, aunque no ha logrado derrotarla del todo. En la física, la victoria ha sido casi completa, pero en otras ciencias, tales como la biología, y la psicología, las explicaciones de tipo teleológico son aún abundantes. A estas explicaciones se las halla disfrazadas, más o menos, en un lenguaje pseudodeterminista.

La reacción contra el finalismo fue muy saludable para la ciencia. Las explicaciones teleológicas eran demasiado fáciles. No tenían, además, valor predictivo alguno, y no eran sometibles a pruebas experimentales, es decir, no resistían al criterio operacional. Hacer un experimento es someter a un sistema actual que, en el futuro, estará solamente en un estado determinado, a ciertas condiciones que modifican esta probabilidad ulterior. Nuestra intervención en el sistema es posible como seres humanos. En cambio, no nos es posible efectuar un experimento en reversa. No podemos ver cómo, una modificación de un estado futuro de un sistema, podría influir sobre los estados pasados. El fracaso de la dinámica rígida newtoniana, y la introducción de la noción de probabilidad al determinismo de la física moderna llevada a cabo por Maxwell, por Gibbs y por Boltzman, ha cambiado, importantemente, el panorama científico contemporáneo.

Los argumentos calificados como teleológicos son, generalmente, de la forma siguiente: "La sangre de un mamífero posee determinadas propiedades, *con el objeto* de defender a este organismo contra la invasión de determinados gérmenes." También pueden tener una construcción, en la cual el determinismo por el futuro es menos obvio: "Los mecanismos de defensa del mamífero M, contra los gérmenes  $g_1, g_2, g_3, \text{etc.}$ , son  $d_1, d_2, d_3$ ."

En muchos casos, la teleología de una proposición es puramente formal. Por ejemplo, cuando digo: "El pulmón humano defiende al organismo al cual pertenece contra la invasión del bacilo de la tuberculosis. Entre otras cosas, lo hace envolviendo a dicho bacilo en una cápsula de tejido conjuntivo impidiendo, por este mecanismo, su penetración a la sangre y su consecuente invasión de otras vísceras." En este caso los antiteleologistas me censurarían severamente. Si en cambio digo: "La penetración del bacilo de Koch al tejido pulmonar determina una proliferación local en el tejido conjuntivo que enquistas al bacilo. Este enquistamiento determina la localización del bacilo e impide, así, su entrada al torrente sanguíneo y su llegada a otras vísceras." De esta manera, no creo que se me acusara de haber enunciado una proposición teleológica. En realidad, aunque la fraseología es distinta, el contenido de las dos proposiciones difiere poco o nada.

Si confesara que en muchos de mis trabajos científicos, al seleccionar variables para un experimento, o al buscar un mecanismo para un proceso fisiológico, recurrí, como han recurrido muchos otros fisiólogos, a consideraciones abiertamente teleológicas, de defensa o beneficio para el organismo, seguramente que algunos críticos podrían reprochármelo. De hecho, las consideraciones de esta índole pueden ser útiles durante el planteo de un problema, aun cuando sean después desechadas en la presentación final del estudio.

Consideraciones de este tipo, podrían ser vertidas a un lenguaje determinista, por ejemplo: por inducción infiero que las funciones de determinado órgano, en una especie que se ha preservado por numerosas generaciones, deben estar armónicamente coordinadas con las funciones de los demás órganos; por lo tanto, cabría decir que en el gato, la secreción de adrenalina no debe oponerse al buen funcionamiento del corazón y que, por consiguiente, es probable que no haya secreción de adrenalina en condiciones de reposo, cuando el gasto cardiaco es bajo, y que sí la haya durante el ejercicio muscular, cuando este gasto es elevado. Este argumento podría ser la base para la búsqueda de un reflejo que diera como resultado, la secreción de adrenalina cuando el gato hace ejercicio muscular. La misma búsqueda podría seguir a la suposición de que: "La secreción de adrenalina es útil para el gato durante el ejercicio."

Habiendo concluido, como concluimos antes, que el nexo causal es ilusorio, es tan ociosa la discusión de si hay causas finales, como lo es, la de si hay causas antecedentes. Los casos citados hasta aquí son triviales, y ello es, porque en realidad no se postula en ninguno de ellos un efecto que anteciedera a una causa. El problema importante en el estudio de un proceso o de una secuencia de eventos, desde el punto de vista que nos ocupa, es decidir si los estados subsiguientes de un sistema deben, o no, ser tomados en consideración al analizar el determinismo de los estados antecedentes.

En 1943, Wiener, Bigelow y yo, abordamos este problema. Nuestra respuesta a esa pregunta fue afirmativa. En el diseño de una máquina o aparato destinado a apuntar automáticamente un cañón a un aeroplano, o a un barco de guerra, el margen de error es registrado y los movimientos del cañón tienden a reducir este error a cero, es decir, a apuntarlo directamente al blanco. Para este objeto el aparato contiene órganos de los sentidos, es decir, mecanismos que le informan cual es el error en un momento dado. Las señales que reciben estos receptores modifican continuamente la rotación de los diversos engranes que mueven el cañón. La máquina emite energía, y una parte de esta energía le regresa a través de sus receptores y modifica la emisión ulterior. Las máquinas de este tipo se designan con el nombre de máquinas con "retroalimentación" (*feedback*). El estudio de los mecanismos de este tipo es relativamente reciente, y constituye uno de los desarrollos más importantes que ha habido en ingeniería

en los últimos años. Lo importante para nosotros, es que la descripción y el análisis de los movimientos de la máquina, o del cañón, no nos daría sino un conocimiento muy pobre e incompleto, si no incluyéramos en dicho análisis el hecho de que la máquina tiene un propósito o finalidad, la de reducir al mínimo el error. El proceso no terminará hasta que esta minimización haya sido alcanzada.

En el trabajo citado, sugerimos Wiener, Bigelow y yo, que en los organismos animales ocurren procesos enteramente semejantes al que acabamos de describir para una máquina. Específicamente, los movimientos llamados voluntarios pertenecen a esta categoría. Si yo decido recoger un objeto de una mesa, no cuantifico, deliberada o inconscientemente, el número de impulsos nerviosos que llegan a determinados músculos, sino que me propongo una meta y ésta la alcanzo por la corrección del error, es decir, de la distancia a la cual se encuentra, a un momento dado, mi mano del objeto. Las señales que me indican el error son múltiples: de los propioceptores musculares y articulares que señalan la posición de mi mano con respecto a mi cuerpo, y de los receptores de la retina que señalan tanto la posición de la mano como la del objeto. Todas estas señales modifican el movimiento y lo guían; su importancia es ostensible cuando falta alguna de ellas, o cuando su integración en el sistema nervioso central no es apropiada. Los titubeos de un ciego, los de un tabético cuando está en la oscuridad, y el temblor de la ataxia cerebelosa, son ejemplos de la importancia de dichas señales.

Lo importante en este caso, como en el de la máquina, es que el estudio del movimiento voluntario, como simple movimiento, como sucesión de contracciones y relajaciones de distintos músculos, es pobre e incompleto. Si queremos entender estos movimientos, y exhibir su mecanismo y su determinismo, es indispensable que incluyamos en el proceso el estado final, es decir, el propósito o meta.

En todos estos casos, un análisis basado en el clásico principio rígido de la causalidad, por indefinible que sea este principio, nos llevará a establecer leyes que pueden ser exactas, pero que no explicarán sino una fracción de los procesos estudiados; la parte más importante de ellos, sin embargo, la que los caracteriza y los hace dignos de estudio, no será ni siquiera vislumbrada. El que tenga temor de ser calificado de teleólogo no debe estudiar estos fenómenos, porque, con tal criterio, nunca logrará comprenderlos.

Quizá el calificativo de teleológicos no es el mejor que podría aplicarse a los procesos que estamos discutiendo. El estudio de estos procesos, en la forma que hemos propuesto, no viola ninguna de las leyes del determinismo científico. El sistema, para su análisis, no consiste sólo de la máquina o del organismo considerados, sino que incluye a la meta y a las relaciones entre una y otra entidades. El proceso está dirigido por las relaciones que hay entre el eje longitudinal del cañón y el blanco, o entre la

mano y el objeto sobre la mesa, y termina cuando estas relaciones se ajustan a una norma, fijada de antemano en el futuro. En este sentido, el estado final determina al proceso, aun cuando esta determinación sea muy distinta de la ingenua y poco crítica que se ha postulado cuando se habla, seriamente, de causas finales.

Este tipo de procesos podrían ser englobados con el término de comportamiento predictivo. El comportamiento predictivo admite diversos órdenes o grados. El gato que persigue al ratón es un ejemplo de predicción de primer orden —el gato sólo predice el curso de la carrera del ratón. Arrojar una piedra a un objeto que está en movimiento, requiere de una predicción de segundo orden; es preciso prever las trayectorias, tanto de la meta como la de la piedra. Las predicciones son de un orden superior cuando se tira con una honda, o con un arco y flecha, a un blanco que está en movimiento.

La predicción requiere la discriminación de cuando menos dos coordenadas, una temporal y, cuando menos, un eje en el espacio. La predicción será más efectiva y flexible, si el objeto que reacciona puede responder a los cambios que ocurran en más de una coordenada en el espacio. Los receptores de un organismo, o de una máquina, pueden, así, limitar el comportamiento predictivo.

La adopción de un punto de vista que reconoce el propósito, simplifica el análisis del comportamiento dirigido hacia una meta, y amplía los resultados de este análisis. Esta metodología no implica, de ninguna manera, la creencia filosófica en la existencia de causas finales. Empleamos los términos de teleología, o de propósito, con un significado muy distinto del clásico: queremos subrayar que hay fenómenos para cuyo análisis conviene no desentenderse de los estados futuros.

# *Explicaciones, hipótesis, leyes*

Consideremos ahora algunos de los recursos que emplea el investigador de la ciencia. Muchos de estos recursos son designados con términos que, a veces, son empleados con distintas connotaciones. Trataremos de precisar sus significados y el papel que desempeñan en el curso de la elaboración de una investigación científica.

## EXPLICACIÓN

El término *explicación* implica, generalmente, un criterio subjetivo: decimos que algo ha sido explicado cuando en la mente del explicador o de su auditorio, o de ambos, la sensación de misterio o de oscuridad, da lugar a una de comprensión o de claridad. Es evidente que este criterio es malo, porque será muy distinto para diferentes personas. Las hay que considerarán haber dado o recibido una explicación satisfactoria al enunciar, o escuchar la enunciación, de tautologías verbales. Es claro que estas tautologías no constituyen afirmaciones científicas. Un ejemplo es el de las "propiedades adormecedoras del opio," que satirizó Moliere en una de sus obras.

Se dice, a menudo, que explicar consiste en expresar o resolver un problema desconocido en términos familiares. Este criterio es aplicable a una explicación didáctica, pero no a la explicación científica. Por ejemplo, la explicación de un problema de mecánica para una persona que conoce preferentemente la electricidad, consistiría en expresar el caso mecá-

nico bajo la forma de una analogía eléctrica. En cambio, para explicar a un mecánico alguna de las leyes de la electricidad, el procedimiento consistiría en buscar una analogía mecánica.

No creo que sea acertada la idea común, de que uno de los propósitos de la ciencia es buscar la explicación de los fenómenos. La noción de explicación es una noción *a posteriori* que sugiere, simplemente, que el estudio de determinado fenómeno ha alcanzado determinado grado de madurez, o sea, que el fenómeno ha sido incorporado a una teoría. No es posible, sin embargo, obtener algún criterio objetivo, ni para definir la explicación, ni menos aún para medirla. La noción de explicación es una noción importante desde el punto de vista didáctico o retórico, pero no lo es desde el científico.

#### HIPÓTESIS

La palabra *hipótesis*, que en griego significa poner abajo, someter, tiene raíces semejantes a las de la palabra latina *suposición* (de: *sub-ponere*). Uno y otro términos significan la aceptación provisional de una afirmación acerca de algún hecho, o de alguna relación funcional, como cierta, aun cuando no tenga base experimental adecuada y suficiente. Esta definición de la hipótesis, que la hace una mera suposición, fue la que tenía presente Newton cuando enunció la famosa frase: "*Hypotheses non fingo*," indicando que presentaba una teoría que ya había sido sometida a una prueba experimental, contrastando así las hipótesis y las teorías.

De hecho, la significación de la palabra hipótesis ha evolucionado en su uso en el lenguaje científico. Hoy en día, no existe una línea de separación precisa entre las hipótesis y las teorías científicas. Como hemos dicho anteriormente, las pruebas absolutas o definitivas no existen en la ciencia. Hay toda una escala de grados de verosimilitud, y no se puede separar lo no probado de lo ya probado sino en los casos extremos. Hay hipótesis, las llamadas hipótesis de trabajo por Claudio Bernard, que son explícitamente suposiciones provisionales; pero también se designan como hipótesis, a proposiciones acerca de los hechos que tienen un grado considerable de probabilidad, porque ya han sido sometidas a diversas pruebas experimentales.

La distinción entre hipótesis y teorías, no depende tan sólo de la mayor o menor probabilidad respectiva de las unas y de las otras. Se aplica también un criterio de generalidad, o complejidad, que tampoco es susceptible de una delimitación precisa. El término *teoría* se restringe, en general, a un cuerpo de doctrina científica aplicable a un grupo amplio de hechos o fenómenos, y que implica correlaciones entre eventos de distinta índole. El término *hipótesis*, más modesto, se refiere a principios, o esquemas abstractos, de campo de aplicación más limitado. Los dos términos se emplean a menudo en forma intercambiable.

El concepto de hipótesis de trabajo merece una consideración especial, ya que constituye la base de toda la experimentación fértil e interesante. Francis Bacon, el canciller, a quien, en mi opinión, se ha atribuido una importancia exagerada como filósofo de la ciencia, propuso que el procedimiento apropiado para encontrar relaciones entre las variables, consiste en coleccionar datos hasta que aparezcan relaciones funcionales claras. Preconizó, así, una técnica esencialmente estadística, en la cual la intuición desempeña un papel mínimo o nulo. Los métodos estadísticos tienen su lugar en la ciencia, pero son siempre largos y laboriosos, y llevan poca probabilidad de encontrar relaciones funcionales importantes en un sistema complejo de variables. Me viene a la mente un caso reciente de aplicación del método sugerido por Bacon a un problema de importancia social muy grande, pero también de elevada complejidad: la esquizofrenia. Un grupo de psiquiatras americanos dedicó varios años a coleccionar datos fisiológicos muy diversos en un numeroso grupo de esquizofrénicos. Midieron la presión sanguínea, la frecuencia cardíaca, la glucosa de la sangre y del líquido cefalorraquídeo, el nitrógeno y la urea de estos mismos líquidos. Se hicieron también un gran número de pruebas funcionales. Se empleó mucho tiempo, se desarrolló una labor intensa, se gastó mucho dinero. El análisis minucioso de los numerosos datos recogidos, no mostró ninguna alteración sistemática de alguna de las variables que fueron medidas. El número total de variables que presenta un organismo humano, cuando se le somete a diversas pruebas funcionales o experimentales, es prácticamente indefinido. La probabilidad *a priori* de acertar con las variables pertinentes es, así, prácticamente nula. No es sorprendente, por lo tanto, que el grupo de investigadores en cuestión haya fracasado.

Quiero subrayar las relaciones estrechas entre las hipótesis de trabajo y los postulados científicos, que antes fueron mencionados (ver pág. 41). Estas hipótesis son también postulados, en el sentido de suposiciones arbitrarias que orientan y guían la investigación científica. No pierden su carácter de postulados, sino cuando pueden ser derivadas *a posteriori*, a partir de una serie de experimentos, es decir, cuando ya dejaron de ser hipótesis de trabajo para convertirse en teorías. Tanto los postulados generales como los parciales que inician un experimento, tienen un carácter provisional y tentativo. Los primeros han sido retenidos, porque llevan ya mucho tiempo de resistir con éxito a numerosas pruebas experimentales de distintos tipos; los segundos tienen, en general, una vida más efímera, tan corta que muchos mueren inmediatamente después de nacer. El carácter y el criterio de validez de unos y otros de estos postulados, es, sin embargo, semejante.

Un experimento es una pregunta que se hace a la naturaleza. Implica siempre una hipótesis. Hay preguntas pertinentes y buenas, aunque también las hay no-pertinentes y malas. No puedo resistir la tentación de citar el ejemplo clásico de un experimento no-pertinente que elaboró el ingenio de Eliseo Ramírez: tocarle a un maguey, en violoncello, y acompañado por

acordeón, la *Serenata* de Schubert, con el fin de observar si eso modificaría la curva de su crecimiento. La hipótesis de trabajo formula una pregunta, y aun cuando esto tiene en apariencia un carácter arbitrario, no es probable que, a un buen experimentador se le ocurriera formular preguntas del tipo de la que satirizó el doctor Ramírez.

Las hipótesis deben ser siempre susceptibles de confrontación con el experimento. No deben, en general, discordar con hechos o principios establecidos. Este punto es importante de retener. Pero puede haber ocasiones en las que una hipótesis, por ser revolucionaria, puede cambiar los principios establecidos en todo un campo. Entonces, será preciso cambiar los principios previamente adoptados, los que no concuerdan con la nueva hipótesis.

Conviene que una hipótesis no sea demasiado remota en sus alcances, ni rebuscada. Si lo fuera, se convertiría en conjetura, o especulación. Sin embargo, todas las hipótesis, en principio, son especulativas hasta que son sometidas a alguna prueba experimental.

#### LEYES

Las leyes son fáciles de definir. Son expresiones que afirman, en forma cualitativa, o de preferencia cuantitativa, relaciones funcionales entre dos o más variables. Si decimos que la tensión desarrollada por la contracción de determinado músculo liso, la membrana nictitante del gato por ejemplo, varía en función de la concentración de la adrenalina que le administremos, enunciamos una ley cruda, porque es sólo cualitativa. Si medimos las respuestas correspondientes a una serie de dosis variables de adrenalina, y hacemos una gráfica trazando la curva que une a los puntos experimentales, obtendremos una expresión más científica de la ley. Si, finalmente, encontramos una expresión matemática que nos diga en forma precisa, cómo varía la tensión de la contracción en función de la concentración de adrenalina, nuestra ley será completa. Las leyes, aun cuando implican obviamente un alto grado de abstracción, son tratadas, desde el punto de vista científico, como hechos, no constituyen teorías, y la única objeción que pudiera hacerseles, es su falta de concordancia con las medidas experimentales.

## *Los modelos científicos*

La construcción de modelos de los fenómenos naturales es una de las tareas esenciales de la labor científica. Más aún, podemos decir que toda la ciencia no es sino la elaboración de un modelo de la naturaleza. Consideremos pues, las características de este tipo de modelos, y el papel central que desempeñan en la investigación científica.

La intención de la ciencia y el resultado de la investigación científica, son el obtener conocimientos y control de alguna parte del Universo. Ahora bien, ninguno de los objetos o fenómenos es tan sencillo que pueda ser considerado o abarcado en su totalidad. Los eventos naturales son casi siempre demasiado complejos, para que podamos comprenderlos o estudiarlos en todos sus aspectos. Abstraemos o singularizamos determinadas variables del complejo, para su estudio. Al hacer esta abstracción hacemos, desde el principio, un modelo idealizado del objeto o evento en estudio, es decir, estamos sustituyendo la parte del Universo que estamos estudiando, por un modelo de estructura similar, pero más sencilla. Esto significa que los hechos científicos son modelos de los reales.

Un experimento encierra una pregunta que se le hace a la naturaleza. Esta pregunta puede ser buena o mala. Será buena cuando la respuesta es precisa; mala si la respuesta no tiene sentido o si ofrece resultados inconsistentes o discrepantes. La formulación de tal pregunta, que siempre es abstracta, implica ya la planteación de un modelo. No todas las preguntas científicas son susceptibles de una confrontación inmediata con la reali-

dad. En general, las preguntas muy abstractas y las que intentan cubrir muchos aspectos del conocimiento, no son inmediatamente reducibles a la prueba experimental. Será preciso descomponerlas en términos más concretos y específicos, antes de su confrontación con la realidad por el experimento.

Las consideraciones anteriores sugieren que hay en la ciencia diversas categorías de modelos del Universo que difieren por su grado de abstracción. En efecto, sin insistir en una subdivisión muy detallada, nos conviene examinar por separado a los modelos teóricos, o formales, y a los modelos materiales o reales. Empecemos por definir estos términos.

Un modelo material es la representación de un sistema real, por otro distinto que se supone tiene algunas propiedades semejantes a las que se desean estudiar en el sistema original. Por ejemplo, podemos tomar a un sistema de resortes sumergidos en un medio viscoso como análogo, en sus propiedades viscoelásticas, a un músculo, y podemos experimentar con el primero para intentar obtener conocimientos precisos acerca del segundo. De manera semejante, podríamos considerar a la corteza cerebral de un mono, como poseyendo muchas de las características de la corteza del hombre, estudiar algunas de las propiedades de los elementos nerviosos que constituyen la corteza del mono, y trasladar nuestras inferencias a la corteza cerebral humana.

Un modelo formal es la expresión simbólica, en términos lógicos, de una estructura idealizada que se supone análoga a la de un sistema real. Cualquier ley, o cualquier teoría, es un modelo formal de los fenómenos a los cuales es aplicable. Exhibe relaciones entre las distintas variables de estos fenómenos, y afirma que estas relaciones formales son semejantes a las que existen en los fenómenos reales. El parentesco entre la teoría y la realidad, es análogo al que existe entre una partitura musical impresa y la sinfonía correspondiente cuando la toca la orquesta. Los símbolos de la partitura, guardan una correspondencia unívoca con los sonidos correspondientes. Las relaciones de los sonidos se desarrollan en el tiempo; las de la partitura en el espacio, pero la estructura musical es, fundamentalmente la misma.

Conviene hacer notar que la adopción de un modelo real, para un fenómeno dado, implica la construcción previa de un modelo formal, que puede ser poco o muy preciso. En efecto, la afirmación que el proceso real *B* puede servir para determinados propósitos, como modelo adecuado para el estudio del proceso *A*, implica el reconocimiento de lo que tienen, de común y de diferente, los dos procesos. Lo que tienen en común es lo que constituye un modelo teórico.

Los modelos materiales pueden ser útiles en los casos siguientes. Pueden permitir la realización de experimentos en condiciones más favorables que las que rigen en el sistema original. Ya cité el empleo de la corteza cerebral del mono, o aún de la del gato o del perro, como modelos de la

corteza cerebral humana. En general, gran parte de los conocimientos de la fisiología humana, está basada en experimentos realizados en especies inferiores. La experimentación en el hombre es, por razones obvias, difícil o imposible de realizar en muchos casos. Las analogías entre los organismos inferiores y el organismo humano son, en muchas ocasiones, suficientemente abundantes para justificar el estudio de los fenómenos biológicos en las formas inferiores, y la extrapolación que se hace de los resultados en ellas obtenidos. Las diferencias que existen entre el hombre y otras especies, aún con los monos antropoides, son tan marcadas, que la extrapolación que se hace es, muchas veces, aventurada.

Un modelo material puede, algunas veces, cambiar favorablemente las escalas del espacio o del tiempo. Por ejemplo, para el estudio de la resistencia de diversos materiales de construcción, no es necesario recurrir a la ejecución de grandes construcciones sino que basta, en general, estudiar su comportamiento en construcciones pequeñas. Otro ejemplo del cambio en la escala de las dimensiones, es el empleo de animales pequeños para el estudio de la fisiología de los organismos grandes.

Como ejemplo de un modelo que modifica la escala del tiempo, podemos citar el empleo de la rata, o aún de las bacterias, para los estudios de genética, en vez de recurrir a especies con un ciclo de vida y de reproducción mucho más prolongado. Algunos procesos afectados por la temperatura, pueden ser más fácilmente estudiados en especies que soportan, o que habitan usualmente a temperaturas más bajas que las de los mamíferos homeotermos.

Como último ejemplo de una transformación que facilita los procedimientos experimentales, citemos el uso de modelos hechos con plásticos transparentes, con propiedades elásticas apropiadas, para el estudio de la elasticidad de las estructuras de acero. La transparencia permite que la luz polarizada, haga visibles las tensiones internas que se desarrollan.

Los modelos reales han sido también muy empleados para trasladar problemas de un campo oscuro, con muchas incógnitas, a otro más familiar. Este cambio puede ser favorable para el estudio. La historia del desarrollo de la ingeniería, ilustra este proceso. Durante los siglos XVIII y XIX, el éxito de la dinámica newtoniana dominaba a la física, en tal forma, que los problemas eléctricos eran abordados, frecuentemente, por analogías mecánicas. Después de la obra de Faraday y de Maxwell el conocimiento de los fenómenos eléctricos ha sido tan grande en su desarrollo, que actualmente es muy superior al de los fenómenos mecánicos. En este siglo, los modelos eléctricos han sido, y son, empleados en abundancia para resolver problemas mecánicos.

Este hecho de buscar analogías entre dos campos científicos diferentes, puede tener importantes ventajas didácticas y teóricas. En ocasiones, sin embargo, puede ser seriamente perjudicial. Esto se debe al hecho de que no todos los modelos reales, son buenos o deseables. Por ejemplo:

1. Si el modelo formal, que sugiere el empleo de determinado modelo real, es débil, o trivial, el uso del modelo real será no-pertinente y además, estéril. En otras palabras, las analogías burdas no son fructíferas para el estudio científico.

2. Si un modelo material no sugiere ningún experimento realizable, cuyos resultados no se pueden anticipar a partir del modelo formal correspondiente, dicho modelo será superfluo.

3. Finalmente, si un modelo, material o formal, tiene más atributos variables e independientes que el fenómeno al cual se aplica, el modelo no ayuda sino que perjudica.

Para ilustrar estos criterios, citemos algunos ejemplos de modelos inadecuados. Precisamente, cuando la física estaba dominada por la mecánica newtoniana, se pensó que el conocimiento físico ideal, consistía en la mecanización de todos los fenómenos. Maxwell y Poincaré han mostrado que cualquier fenómeno eléctrico, térmico, óptico, o de otra naturaleza, es susceptible de mecanización siempre que siga la ley de la conservación de la energía y la de la "acción mínima," es decir, la que afirma que el valor medio de la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial es tan pequeño como posible en cualquiera de los dos sistemas en los que se realiza el cambio. Lo interesante es que, entonces, no hay una sola, sino un número indefinidamente grande de soluciones mecánicas posibles. De tal manera que la elección de una cualquiera, será arbitraria y carente de valor explicativo alguno. Así, los numerosos modelos mecánicos del éter, que usaban cuerpos elásticos y giroscopios, resultaron todos estériles y engañosos. Los modelos mecánicos de los circuitos eléctricos inductivos son todos más complicados que los circuitos originales.

En otro terreno, un ejemplo de una analogía poco fructífera es la propuesta por el llamado modelo de Lilly para el estudio de las propiedades del nervio. Si se sumerge un alambre de fierro en una solución apropiada de ácido nítrico, hay una reacción inmediata que pronto se detiene. El alambre queda cubierto de una capa de óxido que, en cierto modo, lo protege de seguir siendo atacado por el ácido. Se dice que queda en situación "pasiva." Ahora, si se "estimula" al alambre, eléctrica, mecánica, o químicamente, se produce una onda de activación que recorre el alambre con una velocidad determinada y que tiene ciertas semejanzas con un impulso que propaga a lo largo de una fibra nerviosa. Ahora bien, no es más fácil experimentar con un alambre en ácido nítrico que con un nervio vivo. Los fenómenos de los metales "pasivos" no se conocen mejor que los de los nervios. De tal modo, que si no se decide que la analogía es enteramente burda, es más probable que el nervio sea un mejor modelo para el alambre pasivo, que a la inversa.

Antes de pasar a la consideración de los modelos formales, conviene señalar la existencia de modelos con la apariencia de materiales, pero que son, en realidad, estructuras teóricas. Un ejemplo aclarará esta afirmación

que, a primera vista, parece paradójica. En numerosos problemas físicos o fisiológicos, se hacen diagramas de circuitos eléctricos que aparecen como modelos del fenómeno en estudio. Para citar un caso específico, en un estudio que hicimos Wiener, Pitts, García Ramos y yo, de la propagación de impulsos en las fibras nerviosas, propusimos que las propiedades eléctricas de las fibras son, desde el punto de vista de esta propagación, iguales a las de determinados circuitos eléctricos. Lo interesante, para el objeto que nos ocupa, es que nunca nos preocupamos por construir un modelo real que incluyera las partes eléctricas de nuestro circuito. Es más, si lo hubiéramos intentado, hubiéramos tenido que emplear mucho material y mucho tiempo. Al final, es posible que nuestro modelo real, no hubiera propagado impulsos como los del nervio. Los elementos de nuestros circuitos eran elementos teóricos idealizados, y el circuito no era, en realidad, sino una forma especial de simbolizar unas ecuaciones diferenciales. Nos era más fácil considerar los circuitos que las ecuaciones. Los circuitos, aun cuando posiblemente realizables en un modelo material, fueron empleados por nosotros como un modelo teórico altamente abstracto.

Podemos, así, definir un modelo formal como la expresión simbólica, en términos lógicos, de un sistema ideal relativamente sencillo con la misma estructura que un sistema real original. La comprensión de los modelos formales, requiere una clave de los símbolos empleados, es decir, requiere entender lo que estos símbolos representan. Exige, también, el establecimiento de reglas para pasar de los símbolos a la realidad y *viceversa*. Por ejemplo, la ley de Boyle y Gay Lussac, es un modelo formal de ciertas propiedades de los gases. Necesitamos saber lo que representan los símbolos  $P$ ,  $V$ ,  $R$  y  $T$ , y necesitamos conocer las reglas para darles valores a estos símbolos, es decir, necesitamos convenir en un sistema de unidades y de medidas. El modelo es apropiado, porque expresa las relaciones que existen entre estas variables en los gases.

Hay dos tipos de modelos teóricos, en concordancia con el hecho que hay dos tipos de problemas, a los que designamos, Wiener y yo, como problemas de "caja cerrada" o de "caja abierta." Supongamos que tenemos una caja que encierra partes eléctricas conectadas entre sí, y que tiene algunas terminales de este circuito accesibles al exterior. Podemos, sin necesidad de abrir la caja, haciendo uso de las terminales adecuadas, determinar la impedancia del circuito desconocido, midiendo las variaciones de la corriente de salida, en función de las de la corriente de entrada. Podemos dar una expresión matemática a esta impedancia, y podemos utilizar la caja para la construcción de un aparato eléctrico más complicado. El análisis funcional que hemos hecho, sin embargo, no nos dice nada acerca de la estructura específica de las partes contenidas en nuestra caja cerrada. Hemos logrado, sin embargo, un modelo teórico que concuerda con nuestro objeto, por lo que a la impedancia se refiere. Si después abrimos la caja y reconocemos las piezas eléctricas que contiene, podemos hacer un aná-

lisis estructural y elaborar un modelo teórico más concreto, que tendrá más amplias aplicaciones.

La mayor parte de los problemas científicos empiezan como problemas de caja cerrada. Podemos analizarlos funcionalmente, y realizar modelos que describan su comportamiento en las distintas circunstancias que exploremos. Estos modelos teóricos funcionales, sugieren estructuras posibles. La caja, inicialmente cerrada, se va abriendo y hace que nuestros modelos, se vuelvan en parte funcionales y en parte analíticos. Los conocimientos actuales de las funciones del sistema nervioso, se encuentran en este estado. La teoría de la excitabilidad de las fibras nerviosas es, esencialmente, una teoría puramente formal, matemática, en la cual muchos parámetros carecen todavía de significación fisiológica.

Hemos dicho que uno de los objetos de la investigación científica, quizá el más importante, es la elaboración de modelos de los procesos y fenómenos naturales. Esta construcción requiere el conocimiento de las características y propiedades de dichos procesos o fenómenos.

Para terminar, consideremos los límites en la elaboración de modelos. Un modelo material será primero necesariamente, un modelo parcial. Será semejante al original en algunos aspectos, pero necesariamente distinto en muchos otros. Si queremos perfeccionarlo, tendremos que complicarlo agregándole algunas semejanzas más. Si continuáramos en este proceso llegaríamos al absurdo, ya que el mejor modelo de un gato, es otro gato, o de preferencia, el mismo gato original. Esta situación es enteramente semejante a la que sugirió Lewis Carroll, en uno de los episodios de *Sylvie y Bruno*, donde el deseo de obtener un mapa completo llevó a la conclusión de que el único mapa completo posible tendría que estar a la misma escala de la región cuyo mapa se quería obtener y que, por lo tanto, el mejor mapa del país era el país mismo.

Igual dificultad se presenta en el caso de los modelos teóricos. El modelo teórico ideal sería aquel que abarcara a todo el Universo, que tuviera igual complicación que el Universo, y que tuviera una correspondencia unívoca con el Universo en todas sus partes. Pero la persona que pudiera comprender y elaborar un modelo de esta índole, ya no lo necesitaría porque sería capaz de comprender directamente al Universo en su totalidad.

La ciencia postula que la mente humana es finita y limitada, y que no es capaz de esta comprensión directa. Aspira a modelos o teorías de orden muy general, pero acepta, con modestia prudente, que esta generalidad tendrá, por necesidad, siempre algunas limitaciones.

## *Los aspectos no-lógicos de la ciencia*

Las labores científicas incluyen aspectos, pasos, o procesos que no son lógicos, sobre los cuales no se puede razonar, ni pueden ser codificados o, por lo menos, sobre los que no se pueden señalar reglas generales de procedimiento o de conducta, en otras palabras, aspectos que no son susceptibles de verbalización, de análisis, y de enseñanza. Podemos emplear para designarlos el término genérico de aspectos no-lógicos, para recalcar su diferencia con los aspectos lógicos que ya han sido mencionados. Con el término de no-lógicos no se quiere significar que violan las reglas de la lógica. Cualquier razonamiento, o procedimiento, que fuera antilógico, o sea, que violara algunas de esas reglas, sería absolutamente inaceptable. El término sólo implica que tales procesos están por fuera de los cánones de la lógica, es decir, que la lógica no tiene nada que decir acerca de ellos.

En varias ocasiones ha sido señalada la importancia de la intuición para el éxito de los estudios científicos. Esta intuición se manifiesta desde la selección del problema que se va a estudiar. Hay problemas que no conducen sino a conclusiones parciales, estrechas, que no abren nuevos campos de investigación, que no contestan sino a preguntas extraordinariamente pequeñas y limitadas. El buen investigador huye por instinto de estos problemas; escoge temas que considera lo conducirán, más probablemente a conclusiones de aplicación general, que abren nuevos caminos al conocimiento y que estimularán ulterior investigación. Esta consideración no es razonada; el investigador siente, intuye, que determinados temas

son probablemente exiguos y poco fértiles en tanto que otros son, probablemente, amplios y fructíferos. Desde luego, esta intuición se basa y apoya en la experiencia personal previa. Pero esta experiencia, por sí sola, no basta para señalar los senderos fértiles. Hay un buen número de experimentadores avezados, con un gran caudal de conocimientos y estudios previos, que no aciertan en encontrar tales vetas fructíferas.

La formulación de una hipótesis de trabajo, que es indispensable para el planeamiento de experimentos provechosos, es otro paso esencialmente intuitivo. También en este caso, el investigador de talento no puede explicar porqué prefiere tal hipótesis a tal otra.

La traducción de la hipótesis de trabajo en procedimientos experimentales, la selección del método experimental que se va a seguir, son, a su vez, pasos predominantemente intuitivos. Los distintos investigadores varían considerablemente en su habilidad para planear experimentos críticos y decisivos. La formulación de una hipótesis de trabajo, es la formulación de una pregunta; la confrontación de esta hipótesis con los hechos equivale a la búsqueda de la mejor forma de contestar a tal pregunta.

Por último, la construcción final de la teoría, que incluye las hipótesis de trabajo y los experimentos, es otro paso difícil o imposible de precisar en términos lógicos. Se ha discutido mucho acerca de si los hombres de ciencia, incluyendo a los matemáticos, descubren o inventan sus leyes y teorías. En aquellos días, en los cuales reinaban las ideas rígidas del dinamismo newtoniano, en los cuales se creía en la existencia de espacio, tiempo, causalidad, y aún verdades absolutas, la tesis de que estas leyes o teorías existían independientemente de los observadores, y que el papel del investigador era meramente el de descubrirlas, era una idea sostenida por muchos investigadores.

Pero la ciencia moderna ha abandonado la persecución de lo absoluto. Ahora aceptamos que existe un indeterminismo que no sólo depende del principio de Heisenberg, sino que depende también de que las leyes que rigen a los procesos elementales son, a su vez, indeterminadas, es decir, son simplemente probabilistas y no rigurosas. Aceptamos que todas nuestras medidas son relativas. Aceptamos que la realidad externa no nos es directamente accesible, y sabemos que cada vez que queremos observarla tenemos que modificarla forzosa y necesariamente; o sea, pensamos que los hechos de observación no sólo incluyen al fenómeno estudiado, sino que el observador participa en estos hechos, en una forma activa.

Si todos los hechos son construcciones nuestras, si además, no existen leyes absolutas, entonces parecerá, como más razonable, que todas las leyes y teorías científicas son inventos, más bien que descubrimientos. La ciencia inventa un modelo formal que se ajusta a las observaciones, tal como éstas pueden ser realizadas. Entonces, cada vez que se formula una nueva ley, cada vez que se establece una nueva relación entre eventos que parecían

desconectados, cada vez que se elabora una nueva teoría, de hecho se alcanza algo nuevo, se hace una creación científica.

Poincaré, en una conferencia que dictó ante la Sociedad de Estudios Psicológicos de París, y que forma un capítulo en su obra *La ciencia y el método* (París, 1908), se refiere así a la invención matemática:

“La invención matemática no consiste simplemente en hacer nuevas combinaciones con entes matemáticos ya conocidos. Esta labor podría hacerla cualquiera. El número de combinaciones sería infinito, pero la mayor parte de ellas no tendría absolutamente ningún interés. Inventar consiste, precisamente, en no construir combinaciones inútiles, sino en construir las que son útiles, que son la minoría. Inventar es, así, seleccionar.” Y cita Poincaré los siguientes ejemplos tomados de su propia experiencia:

1. *Ideas caóticas.* Llevaba 15 días tratando de demostrar, sin resultados, que no puede existir ninguna función del tipo de las llamadas *fuchsianas*. Una noche, dice, las ideas se le aglomeraron, las sentía entrechocar, intentando establecer combinaciones estables. A la mañana siguiente, demostró la existencia de una clase de funciones de este tipo, las que derivan de la serie hipergeométrica.

2. *Proceso razonado.* Quiso representar esas funciones como el cociente de dos series. Se hizo la pregunta de cuáles debían ser las propiedades de esas series en caso de que existieran, y fácilmente formó las series denominadas *theta-fuchsianas*. Este proceso fue consciente desde el principio hasta el fin.

3. *Proceso súbito.* Algún tiempo después, sin haber estado trabajando en matemáticas, en el momento de poner el pie en el estribo al subir a un ómnibus, sin que nada en sus pensamientos anteriores pareciera haberlo preparado, le vino súbitamente la idea de que las transformaciones que había empleado para definir las funciones *fuchsianas*, eran idénticas a las de la geometría no-euclídea. No tuvo tiempo de verificarlo, ya que prosiguió la conversación que tenía en curso, pero adquirió una certeza absoluta. De regreso del viaje, comprobó el resultado.

4. *Razonamiento previo infructuoso y solución súbita posterior.* Estudiaba problemas de aritmética, sin sospechar que éstos pudieran tener la menor relación con sus investigaciones previas. No obtenía resultados y, disgustado por el fracaso, se fue algunos días a la playa a descansar. Un día, al pasearse a la orilla del mar, con las mismas características de brevedad, de brusquedad, y de certidumbre inmediata que en el ejemplo anterior (3), se le ocurrió que las transformaciones aritméticas de las formas cuadráticas ternarias indefinidas eran, también, idénticas a las de la geometría no-euclídea.

De regreso a su trabajo, se propuso analizar el problema a fondo. Se encontró una dificultad seria que no pudo resolver. Se fue a hacer su servicio militar y, un día, al cruzar la calle, la solución de esta dificultad le vino bruscamente.

Estos ejemplos no son aislados. Así, Gauss, refiriéndose a un teorema aritmético que había intentado demostrar sin éxito durante varios años, dice: "Finalmente, hace dos días tuve éxito, no como consecuencia de mis esfuerzos, sino por la gracia de Dios. Como un relámpago, el problema se resolvió. No puedo decir cuál fue el hilo que conectó lo que sabía previamente, y lo que hizo mi éxito posible."

Hadamard menciona que en una ocasión, al ser despertado abruptamente por un ruido exterior, le apareció inmediatamente, y sin el menor instante de reflexión por su parte, la solución de un problema que había buscado por largo tiempo; esta solución era muy distinta de cualquiera de las que él había intentado antes. Helmholtz cita un caso semejante de su experiencia personal. En campos muy distintos se ha relatado el mismo fenómeno. Yo sé de varias ocurrencias similares entre algunos fisiólogos, y cuento con otras personales.

Aparece así, que hay tres procesos distintos que pueden conducir a la obtención de descubrimientos científicos. En el primero, un periodo de reflexión sistemática se ve coronado por el hallazgo científico. En el segundo, surgen una multitud de ideas, en apariencia caóticas y desordenadas, que pueden parecer a quien las experimenta, involuntarias; bruscamente alguna de ellas puede plasmarse en un descubrimiento importante. En el tercero, la solución al problema se presentó instantáneamente, sin parecer estar precedido de ningún proceso mental relacionado o afín.

Tanto Poincaré como Hadamard se han preocupado por explicar, especialmente, este tercer modo de descubrir verdades científicas. Hacen notar que el proceso puede ser dividido en varias etapas: *a*) un periodo de reflexión previa, que ordena las ideas y precisa las dificultades; *b*) un periodo de incubación, durante el cual el problema parece estar abandonado; *c*) un proceso brusco (que Poincaré llamó "iluminación" y que podríamos llamar, más popularmente, inspiración), en el que súbitamente aparece la respuesta, si no en sus detalles, sí en sus lineamientos generales; *d*) un periodo ulterior de reflexión, en el cual el sujeto precisa la solución del problema y la verifica, es decir, la confronta con los datos, cuyas relaciones quiere establecer, y con los conocimientos existentes sobre ese tema.

Pasemos, ahora, a las teorías que se han propuesto para tratar de explicar la invención científica.

1. *La hipótesis del azar.* El biólogo Nicolle, entre otros, ha sugerido que los descubrimientos son puramente accidentales, dependen del factor suerte, o de la fortuna. Esta hipótesis es enteramente inaceptable. En un descubrimiento importante ocurren, casi siempre si no invariablemente, una correlación de hechos o leyes que parecían independientes y distantes. La probabilidad de acertar con una correlación feliz, fructífera, de entre un número casi infinito de correlaciones posibles, es tan pequeña que la podemos considerar como nula. Además, la probabilidad de que una misma

persona encontrara, repetidas veces, correlaciones importantes, es aún más baja. Si los descubrimientos se hicieran al azar, estarían probablemente, distribuidos también al azar entre los diversos investigadores. Cuando consideramos que hay investigadores que jamás aciertan, en tanto que otros, que constituyen una reducida minoría, hacen numerosos e importantes descubrimientos, no podemos aceptar la teoría del azar.

Probablemente la casualidad desempeñe un papel en los estudios científicos. Ha habido descubrimientos de trascendencia que al parecer, se originaron en una casualidad feliz. Esto no resta méritos al descubridor, ya que tuvo el talento, o la habilidad, de reconocer la importancia del hallazgo casual. Como dijo Pasteur: "El azar no favorece sino a los espíritus preparados."

2. *La teoría del reposo.* Se ha sugerido que en los casos en los cuales un estudio previo resultó infructuoso, y el descubrimiento se hizo algún tiempo después con facilidad, la explicación podría haber sido por la fatiga mental correspondiente al primer periodo, y a la mayor capacidad psíquica al examinar de nuevo el problema. Esta mayor capacidad sería debida al reposo que medió en el periodo intermedio. Este periodo, o etapa de incubación, sería, así, un estado de reposo.

Esta explicación tampoco es satisfactoria. Sin negar la realidad de la fatiga mental, no hay datos que permitan afirmar que exista correlación entre el grado de fatiga y la incapacidad para realizar descubrimientos científicos. El ejemplo de Poincaré, en el cual el descubrimiento se hizo durante una noche de insomnio, se opone a la idea de que es indispensable una mente reposada para el éxito en la elaboración de teorías científicas.

3. *La teoría del olvido.* Se ha dicho que los fracasos pueden deberse a la toma de una ruta inicial falsa. El investigador caería, insensiblemente, en un surco o en una rutina mental, del cual no puede escapar momentáneamente. La "incubación" consistiría, entonces, en abandonar las ideas preconcebidas y los métodos falsos para abordar de nuevo el problema con la mente despejada.

Esta hipótesis no parece concordar con la brusquedad con la cual puede aparecer el descubrimiento. Atribuye, quizá acertadamente, un papel de despejamiento mental al periodo de incubación, pero no explica satisfactoriamente la iluminación ulterior.

4. *La teoría de la elaboración inconsciente o subconsciente.* Es la interpretación que propuso Poincaré y que defiende Hadamard. Razona Poincaré que lo que aparece como iluminación súbita es, sin duda, el indicio de un largo trabajo inconsciente anterior, que no es posible ni fecundo, sino cuando es precedido de un periodo de trabajo consciente.

Poincaré piensa que los procesos inconscientes serían automáticos, pero que de todas las combinaciones que se forman en esas circunstancias, sólo los pasos interesantes pueden o logran penetrar al campo de la conciencia. El motivo por el cual algunos de los fenómenos inconscientes, los privile-

giados, son susceptibles de hacerse conscientes sería, en opinión de Poincaré, que éstos afectarían más profundamente la sensibilidad estética del investigador. De tal manera, que entre el gran número de combinaciones que el yo subconsciente forma, la mayoría no tiene interés ni utilidad; no tienen atractivo estético. Unas cuantas combinaciones son armoniosas, y por lo tanto útiles y bellas; éstas serían capaces de conmover la sensibilidad estética del hombre de ciencia. Una vez excitada esta sensibilidad estética, la atención se fijaría en ellas y les daría la ocasión de hacerse conscientes. Piensa, así, que una sensibilidad estética especial es la que desempeñaría el papel de filtro. Por esta razón, quien no poseyera esta sensibilidad, jamás sería un verdadero investigador.

La objeción contra la hipótesis de Poincaré, es que recurre a conceptos que no son susceptibles de pruebas operacionales, que no son posibles de confrontación con los hechos. La afirmación de que existen estados mentales inconscientes, que no son percibidos en ninguna forma por el individuo en quien ocurren, es una afirmación, por ahora, inconsistente. La única realidad que podemos asignar a lo mental, es que nos percatamos de que tenemos procesos mentales. En el estado actual de nuestros conocimientos, hablar de procesos mentales que no son percibidos por nadie, parece tan carente de sentido como el discutir la existencia de la serpiente marina, que nadie ha visto.

No debemos, sin embargo, desentendernos de la existencia de los fenómenos subconscientes. Es frecuente que se intente recordar algún nombre, o alguna palabra, y no se logre invocarlo en esos momentos. Si se insiste en perseguir la palabra fugitiva, en muchos casos no se logra alcanzarla. No es raro entonces que si, deliberadamente, se deja de pensar en el asunto, pasados algunos minutos u horas, bruscamente surja la palabra a la memoria. Otro ejemplo, que es también de experiencia común, es el de muchas personas que pueden despertarse a voluntad a una hora fija, aún cuando no sea su hora habitual de despertar, y aun cuando no hayan satisfecho todas sus necesidades de sueño a esa hora. En este caso, tampoco hay ninguna secuencia mental continua entre el momento de formular el deseo, o la intención de despertarse a determinada hora, y el momento en que de hecho se despierta el individuo, a la hora fijada, con una aproximación de minutos. Decir que hay en la mente un lector inconsciente, que va marcando el tiempo y que cuando juzga que ha transcurrido el tiempo adecuado, que ha sonado la hora, despierta a su amo consciente, es usar una imagen que podría tener algún valor literario pero que, por ahora, no tiene valor científico.

Si bien podemos criticar las especulaciones de Poincaré conviene subrayar, y aceptar, el énfasis que le da a la satisfacción estética como criterio importante para aceptar una teoría matemática o científica. En efecto, aun cuando el propósito primordial de la ciencia no sea el de realizar obras bellas, sino teorías que se ajusten a los hechos, es uno de sus postulados que,

entre dos teorías igualmente capaces de explicar un grupo de fenómenos, se preferirá la más sobria y económica, la que introduzca menos hipótesis subsidiarias, la más armoniosa; en otras palabras, la más bella.

Podrá parecer incongruente el empleo del término belleza en estas circunstancias. Es un hecho, sin embargo, que entre las satisfacciones del hombre de ciencia, no nada más existen: la de haber llenado una curiosidad; la de haber alcanzado una verdad aun cuando sea relativa; la de haber construido una invención teórica, que se ajusta a los hechos; la de poder predecir eventos futuros; sino también, y ocupando un lugar muy importante, la de experimentar sensaciones que no difieren de las que se experimentan cuando se leen, contemplan, o escuchan, obras de arte trascendentes.

## *Los aspectos estéticos de la ciencia*

Hay una serie de criterios que permiten clasificar o calificar los trabajos científicos en distintas categorías, según sus diferentes características.

a) Un criterio esencial permite separarlos en *verdaderos* o *falsos*, dependiendo de si la producción científica que se califica está en concordancia con los hechos, o bien está en desacuerdo con ellos.

b) Podemos hablar de trabajos *importantes* y de trabajos *banales*. Por ejemplo, es obvio que un estudio amplio de todas las posibles variaciones de los efectos fisiológicos de la adrenalina, debidas a cambios en la estructura de la molécula de esta sustancia, sería un trabajo mucho más importante que el informe de la acción de una sola de las aminas simpaticomiméticas derivadas de la adrenalina, sobre un solo indicador fisiológico. En términos generales, la importancia de un trabajo científico depende de la generalidad de sus teorías, o de sus conclusiones, y también de su poder de sugestión. Por esta última expresión debe entenderse el mayor o menor grado en el cual una hipótesis determinada sugiere experimentos nuevos y desarrollos ulteriores del conocimiento de los fenómenos a los cuales esta hipótesis es aplicable.

c) Calificamos algunos trabajos como *claros*, o *precisos*, y otros como *oscuros*, *confusos*, o *difusos*. El criterio para hacer esta separación no necesita comentarios.

d) Decimos que algunos estudios son *complicados* y otros *sencillos*. Estos términos pueden referirse a la naturaleza de los fenómenos estudiados;

aunque pueden también referirse a la reacción subjetiva que los estudios en cuestión nos provocan. Decimos que una teoría es sencilla cuando recurre a relativamente pocas hipótesis básicas o subsidiarias para su elaboración. Por el contrario, tildamos de compleja la teoría si consideramos que el número de suposiciones hechas y la cantidad de postulados que contiene es mayor que lo indispensable.

e) Hablamos de trabajos *buenos* y de trabajos *malos*. El criterio es, en estos casos, generalmente con bases heterogéneas y disímolas. Los trabajos buenos deben reunir varias de las características deseables citadas antes: generalidad, claridad, sencillez, etc. Los malos son los que poseen una o más de las características opuestas.

La heterogeneidad de los elementos de juicio para calificar un trabajo científico como bueno o como malo se hace evidente cuando consideramos que ha habido trabajos, juzgados como buenos, que posteriormente se demostraron falsos, es decir, en discordancia con los hechos. Por el contrario, calificamos a menudo como malos, o menos buenos, a ciertos estudios que más tarde han sido verificados y comprobados adecuadamente. Por ejemplo, los trabajos de Keith Lucas, sobre el decremento gradual de los impulsos nerviosos propagados en nervio anestesiado, y los que se referían a la llamada inhibición de Wedensky, condujeron a establecer conclusiones que ahora sabemos que no eran correctas. Estos trabajos, sin embargo, fueron bien planteados, desarrollados con una técnica experimental de primer orden, y bien razonados. El error se debió a la falsedad de una, o varias, de las hipótesis básicas de trabajo. Actualmente se consideran estos trabajos como modelos de estudios experimentales dignos de ser imitados. Podría citar una gran cantidad de ejemplos de trabajos malos que, sin embargo, tuvieron mucha importancia porque fueron el punto de partida para estudios ulteriores provechosos.

f) Hay criterios de otros tipos para juzgar o valorar los trabajos científicos. De entre ellos, es importante subrayar los juicios que son esencialmente estéticos. Decimos, a menudo, que un método es *elegante*, que un trabajo es bonito y hasta bello. Por otra parte, también recurrimos a los adjetivos de significado opuesto. Estos juicios, revelados por estos adjetivos, se aplican no sólo a los trabajos científicos propiamente dichos, experimentales o teóricos, sino también se emplean para calificar estudios matemáticos puramente abstractos (recuérdese el comentario de Poincaré acerca de la creación matemática, pág. 76).

La aplicación de estos criterios estéticos a los estudios científicos o matemáticos implica una reacción subjetiva, eminentemente estética, igual a la que se experimenta cuando se enjuicia una obra de arte. Cuando decimos, por ejemplo, que la teoría de Maxwell sobre las ondas electromagnéticas es una de las creaciones más bellas de la física teórica, queremos decir que hemos experimentado una emoción estética, en todo comparable a la que experimentamos cuando oímos uno de los últimos cuartetos de

Beethoven, o cuando contemplamos el Moisés de Miguel Angel, o cuando leemos el *Macbeth* de Shakespeare.

La reacción estética del hombre de ciencia no sólo se experimenta al examinar la estructura abstracta de una teoría. La técnica que se emplea en un experimento también nos produce una atracción o repulsión estética. Una buena gráfica no sólo debe ilustrar con claridad un fenómeno o una ley; debe también estar bien proporcionada y correctamente distribuida, debe estar exenta de factores o de características que pudieran mermar su elegancia; debe ser grata a la vista, en suma, debe ser estética. Al decir que debe reunir estas características, no quiero solamente afirmar que es preferible que las contenga y que, en rigor, pudiera bastar con que fuera apropiada desde el punto de vista científico, o sea, que ofreciera concordancia con el fenómeno al cual se refiere. Lo que estoy proponiendo es que el aspecto estético no debe considerarse sólo incidental, sino que la ciencia además de aspirar a la verdad debe, también, aspirar a la belleza.

La reacción estética del observador científico puede manifestarse aún ante los hechos mismos de observación. Para ilustrar lo anterior relataré una experiencia personal que me ocurrió con un anatomopatólogo: estaba este investigador llevando a cabo una autopsia. El cadáver llevaba ya algún tiempo en el anfiteatro y a pesar de que el lugar estaba siendo ventilado, reinaba un olorillo desagradable y ostensible. A la mayoría de las personas, la vista de un cadáver nos despierta, habitualmente, sensaciones poco agradables, especialmente si este cadáver está siendo sujeto a una autopsia. En el curso de esta exploración, encontró mi amigo una lesión que después me explicó representaba un ejemplo típico y casi diagramático de un cuadro patológico raro. Mi propia reacción fue de desagrado, aún mayor que el que ya sentía. A él, sin embargo, se le iluminó el rostro, le brillaron los ojos, mostró gran placer y, sonriente, me dijo enfáticamente: "¡Vea usted, qué ejemplar más bello!"

Los criterios que mueven a los hombres de ciencia a calificar como bellos un experimento, una ley, o una teoría, son esencialmente los mismos que llevan al crítico de arte a aplicar el mismo adjetivo a una obra musical, literaria, o plástica. Estos criterios incluyen las siguientes características:

a) *Simplicidad y unidad.* La complicación innecesaria de un experimento o de una teoría los afea. El exceso de ornamentación es indeseable. Lo churrigueresco o el gongorismo, podrá llegar a alcanzar efectos decorativos, pero rara vez llega a dar la impresión completa de la belleza, y esto sucede tanto en el arte como en la ciencia.

b) *Simetría, armonía, orden.* El matemático busca, siempre que puede, una forma simétrica para sus funciones y para sus ecuaciones. Lo hace, no sólo porque es ésta la forma general más fácil de entender y de usar, sino también porque así las encuentra más estéticas. En la ciencia, este criterio es más difícil de aplicar, ya que la simetría, o la falta de ella, no depende

del investigador sino que depende del fenómeno mismo. La armonía y el ordenamiento de los distintos elementos de un estudio científico ayuda a la comprensión de este estudio y contribuye, también, a su aspecto estético.

c) *Concisión, sobriedad, economía.* Por economía, entiendo parquedad de experimentos, de hipótesis subsidiarias, y de argumentos. Si se puede lograr el mismo valor demostrativo recurriendo a un número reducido de estos elementos, la obra final resultará más elegante. Si, cuando es posible hacer un análisis experimental preciso de un problema, en el cual se pueden controlar las variables que intervienen, no se hace tal análisis, sino que se recurre, en cambio, a un estudio estadístico extenso y laborioso, el resultado será que el trabajo final aparece menos elegante de lo que hubiera sido si se hubiera empleado el primer sistema, aun cuando las conclusiones sean las mismas en uno y en otro casos.

La sobriedad y la concisión son tan importantes en la ciencia, tanto para el planeo de los experimentos como para la presentación del estudio, como lo son, por ejemplo, en un autor literario cuando quiere expresar un estado emocional.

d) *Riqueza, cuerpo o sustancia.* Tan importante es para el hombre de ciencia el aspecto estético de sus estudios, que muchos de los postulados básicos de la ciencia (ver pág. 41) tienen, primordialmente, una base estética. Por ejemplo, el postulado de sencillez puede justificarse porque, pragmáticamente, una teoría sencilla es más fácil de ser expresada, de ser entendida, de ser verificada y de ser aplicada, que una teoría complicada.

La insistencia en preferir siempre lo sencillo a lo complejo obedece, primordialmente, a que si el alcance de dos teorías es el mismo, la más sencilla es más bella que la complicada. El postulado, o demanda de generalidad, tiene a su vez una justificación esencialmente estética. La solución de un problema parcial concreto o limitado nos deja, como hombres de ciencia, estéticamente fríos. Por el contrario, una teoría que no sólo se limita a sugerir un modelo formal o abstracto para un grupo particular de fenómenos, sino que sugiere relaciones entre fenómenos de distintas categorías, nos provoca, habitualmente, una reacción estética.

Aun cuando el concepto de generalidad en una obra artística es más difícil de formular o de precisar, es indudable que también desempeña un papel muy importante en la evaluación de dicha obra. Si *Madame Bovary* ha tenido éxito, es porque Flaubert no se limitó a crear una mujer individual. Las *Bovarys*, las burguesas descontentas con un medio estrecho, y rebeldes, existen en todas partes del mundo, o sea, representan un tipo general. Algo semejante podemos decir de la *Nora* de Ibsen, en la *Casa de muñecas*; o de *Muichkine* y de *Ferdichenko*, personajes de Dostoievski.

Tiene su importancia el preguntarnos si la actitud del hombre de ciencia difiere fundamentalmente de la del artista. Yo creo que la respuesta a esta pregunta debe ser negativa. Seguramente que podemos encontrar gran

cantidad de diferencias, ya que uno y otro se dedican a actividades distintas. Estas diferencias son muy ostensibles y constituyen, por lo tanto, el criterio habitual que influye en la opinión popular. Es casi una regla, el contrastar la emotividad rica en matices del artista con la frialdad del intelectual, a quien se supone, deliberadamente, exento de emociones. Es usual escuchar la afirmación que el artista intuye al Universo, o algún aspecto de este Universo, por un método directo y sintético, que abarca este Universo en su totalidad y que, en cierto modo, proyecta su personalidad o la incorpora a la situación o evento que quiere representar. En contraste con este concepto, el hombre de ciencia es acusado de desmenuzar los fenómenos que estudia, en tal afán analítico que en su examen, miope y minucioso de los árboles o de las hojas, puede hasta perder la noción de la existencia del bosque. Y estos contrastes no han sido exclusivos de los profanos, sino que los hacen también los mismos artistas y algunos de los hombres de ciencia.

Insisto en que hay diferencias, y que tiene que haberlas. Pienso, sin embargo, que hay un gran número de semejanzas importantes entre las actitudes del hombre de ciencia y del artista. Uno y otro quieren interpretar al Universo y expresarse a sí mismos. Los dos buscan generalidad y, si es posible, universalidad en sus expresiones. Los dos buscan armonía y uniformidad en la naturaleza. Los dos están preocupados, y es éste uno de sus problemas fundamentales, en tratar de establecer relaciones entre lo particular y lo general, y entre lo concreto y lo abstracto.

Tanto el artista como el hombre de ciencia reconocen las limitaciones de sus técnicas, y se preocupan por estudiar estas limitaciones. La preocupación científica del límite de precisión que pueda alcanzar una medida, o la del grado de alteración que los aparatos de observación introducen al fenómeno en estudio, es muy semejante a la preocupación del pintor por las características de la tela, de los pinceles, y de los colores que emplea; o a la del músico por las características del instrumento o las cualidades acústicas de la sala de concierto; o a la del escultor por las características del mármol.

Tanto el artista como el hombre de ciencia buscan modelar el Universo, a la medida de su propia personalidad, a la medida de la mentalidad humana.

Otro punto de semejanza muy importante es el que subrayó Kant cuando dijo que tanto el arte como la ciencia son finalidades sin fin. Son actividades esencialmente desinteresadas. Una y otra son capaces de tener aplicación: *el arte puede ser empleado con fines de propaganda, con fines comerciales, o para la realización de una tendencia política. De manera semejante, la ciencia es susceptible de aplicaciones a la práctica, buenas o malas; puede emplearse para prolongar la vida humana; para mejorar las condiciones de vida; pero puede también emplearse para la elaboración de bombarderos, de máquinas de guerra, de bombas atómicas, de im-*

plementos destinados, desde su concepción hasta su realización, a destruir vidas, crear enfermedades y miseria; para menguar artística, intelectual, material, cultural y biológicamente a la raza humana.

Pero estas aplicaciones, tanto las buenas como las malas, ni son la responsabilidad del artista como artista, ni del hombre de ciencia como hombre de ciencia, ni son metas del arte como arte, ni metas de la ciencia como ciencia. La única finalidad de cada una de estas aplicaciones es la aplicación misma. La ciencia se ocupa de la verdad y del conocimiento de la verdad; adquiere verdades para adquirir nuevas verdades. Si le hemos de asignar a la ciencia una meta, ésta sería la verdad absoluta, pero la ciencia declara que tal meta es inaccesible y, cuando más, espera acercarse a ella asintóticamente. A su vez, el arte se ocupa de la belleza, y no utiliza las obras bellas del pasado sino para la creación de obras más bellas en el presente y en el futuro. Si hubiéramos de asignarle una meta, sería la de la belleza absoluta, la de realizar obras definitivas. Pienso que los artistas no creen que esta belleza absoluta les sea accesible, y que sólo piensan acercarse a ella asintóticamente.

Consideremos ahora en qué consisten las diferencias entre las obras de arte y las obras científicas. Como ya dije, unas y otras buscan la representación de algún aspecto del Universo. El aspecto creador es semejante en los dos casos. Es cierto que una ley científica ya existe antes de ser formulada por un hombre de ciencia; sin embargo, esta formulación representa la producción de algo nuevo. También las características y los elementos humanos a partir de los cuales formó Cervantes su *Don Quijote* ya existían, si bien dispersos, antes de que Cervantes las reuniera y los animara.

La diferencia fundamental estriba en el modo de tratar las relaciones entre lo particular y lo general, tanto en el arte como en la ciencia. El artista usa lo concreto para representar o evocar lo general y lo abstracto; el hombre de ciencia procede a la inversa, describe lo concreto a partir de lo general.

Se ha intentado, a menudo, hacer una ciencia de la estética, es decir, formular las características de las obras de arte que las hacen ser bellas, y establecer los principios que debieran, si fueran seguidos, conducir a la producción de una obra bella.

No creo que este tipo de análisis pueda llevar a resultados importantes. Es cierto que sí pueden establecerse algunos criterios generales a los que debe ajustarse una obra de arte si ha de considerarse bella. Algunos de estos criterios fueron mencionados al discutir los aspectos estéticos de las producciones científicas, y estos mismos criterios pueden ser aplicados al enjuiciar una obra de arte. Afirmar que una obra de arte debe ser relativamente sencilla equivale a afirmar que no debe ser innecesariamente complicada. Decir que debe tener consistencia o unidad equivale a decir que no con-

viene que esté constituida por distintas partes o fragmentos que no armonicen los unos con los otros. Así se considere el aspecto positivo, o el negativo, de estos preceptos, es evidente que su mera aplicación no va a conducir, necesariamente, a una producción bella.

La obra de arte no se hace como los platillos culinarios, siguiendo una receta. Como, por lo demás, tampoco se hacen las obras científicas importantes siguiendo determinados preceptos. Como ejemplos de producciones pseudoartísticas, que son casi exclusivamente el resultado de la aplicación de series de reglas, podemos considerar muchos de los cuentos que se publican a diario en las revistas literarias. La receta es tan obvia que hasta llega a ser molesta: el joven conoce a la joven; el joven se enamora de la joven; la joven no corresponde al amor del joven; el joven se va al extranjero y en tres años gana mucho dinero; el joven regresa a su país, vuelve a encontrar a la joven y aquí hay dos alternativas, o bien vuelve a requerirla de amores que ahora sí son correspondidos, o encuentra que la joven ya no es digna de ser amada. Esta misma receta la emplean a granel los productores de películas de Hollywood. En la inmensa mayoría de los casos, estas obras pueden resultar agradables, pero no tienen belleza, no llegan a constituir obras de arte. Sin embargo, un escritor artista puede producir una obra bella empleando una trama semejante.

La belleza es una noción eminentemente subjetiva y que se adquiere por condicionamiento. Por lo tanto, la noción de la belleza no es reducible a fórmulas explícitas confrontables directamente con los hechos. La creación artística es eminentemente individual y se resiste también al analista. Por lo demás, igual cosa sucede con la creación científica.

Es un error introducir en la ciencia conceptos o valores utilitarios, hipótesis no cognitivas, o explicaciones absolutas o finales. Creo, también, que sería un error buscar relaciones funcionales entre las estructuras de la *Passacaglia*, de *Las mil y una noches*, y de los frescos de Rivera en Chapingo.

Hay muchos modos de contemplar al Universo. De entre ellos, hay dos que son singularmente elevados y satisfactorios, el artístico y el científico. He intentado exponer algunas de las características del modo científico de contemplar al Universo. Lo he hecho, no porque considere que la actitud científica del hombre es la más estimable o la más perfecta, sino porque es la actitud del hombre de ciencia la que conozco mejor, y porque creo que es digna de comentario y de análisis.

Un comentario final. He hablado en nombre de la ciencia y de los hombres de ciencia. Tengo que reconocer que muchos hombres de ciencia no estarán de acuerdo con muchas de las afirmaciones que he hecho. No creo, sin embargo, que la mayoría esté en desacuerdo con la mayor parte de mis opiniones. Los conceptos vertidos pueden ser tomados, simplemente, como la profesión de fe y de principios de *un* hombre de ciencia.

## Apéndice

# La comunicación de los resultados de un estudio científico

Una de las partes importantes en la realización de un estudio científico es la comunicación de los resultados a otras personas. Si el hombre de ciencia trabaja para contribuir al conocimiento del Universo, su misión únicamente se logra cuando participa a los demás, y somete al juicio de sus colegas, su propia contribución. De esta manera la publicación de sus resultados tiene dos aspectos: 1. El de dar a conocer los resultados de su trabajo, y 2. El de someter a la consideración de otros investigadores las hipótesis y las teorías que él ha formulado, en busca de crítica.

La comunicación de los hallazgos científicos se logra de varias maneras: *a)* la comunicación verbal a un grupo pequeño, en forma de plática informal, seminario o conferencia; *b)* la presentación ante un grupo grande (simposio, congreso), habitualmente acompañada de la publicación, por escrito, de un resumen; *c)* la nota periodística, empleando uno o varios de los medios de comunicación o difusión comerciales; *d)* la publicación de notas preliminares conteniendo sólo los rasgos importantes del trabajo, y *e)* la publicación de este trabajo, *in extenso*, en una revista o periódico científico. La mayor parte de estas formas de comunicación no requieren comentarios, todas ellas son más o menos útiles, dependiendo del número y de la calidad del auditorio hacia quien van dirigidas. La comunicación ante un grupo pequeño de gente con buena preparación, con intereses de campo de investigación semejantes, y en el cual hay oportunidad de discusión sin reticencias, es de preferir a la presentación breve y de carrera en uno de

los sobrepoblados congresos modernos. La nota periodística tiene la desventaja de que, en la mayor parte de los casos, no pueden darse explicaciones al periodista de todos los aspectos del estudio, de suerte que las malas interpretaciones, por una parte, y el afán del periodista de exhibir los asuntos con la mayor notoriedad posible, por la otra, pueden resultar en la deformación de los hechos.

La publicación de notas preliminares admite un pequeño comentario. Está basada, fundamentalmente, en el sentimiento egoísta del hombre de ciencia que quisiera apuntarse para sí el mayor número, o la mejor calidad de los descubrimientos científicos que se realizan. Las distancias grandes entre los diversos centros de trabajo, y el poco tiempo que se destina al intercambio, pueden dar lugar a que dos investigadores, en dos lugares diferentes, conciban la misma idea y realicen su comprobación experimental por separado, pero aproximadamente al mismo tiempo. Lo usual es que se atribuya mayor mérito a quien primero informa los resultados. De suerte que los dos investigadores de nuestro ejemplo tratarán de dar a la publicidad sus hallazgos lo antes posible, en cuanto hayan adquirido cierta certeza sobre la verificación experimental de la hipótesis. La solución es: la nota preliminar. Otra justificación de esta nota es la falta de caballerosidad que alguna vez ha sido observada en alguien que se hace llamar hombre de ciencia, el cual, después de haber obtenido datos nuevos por comunicación verbal, los ha publicado luego como propios. En ocasiones, es posible que no haya habido malevolencia al hacer algo así; la comunicación del vecino solamente coincidió con las etapas finales de un trabajo realizado en forma semejante, o la idea original, que surgió nebulosa durante una conversación, fue realizada posteriormente por el investigador más capaz o con los mejores medios a su alcance. De cualquiera manera, hay casos de hombres de ciencia que se han considerado víctimas de plagio. La solución es, otra vez: la nota preliminar. Hay todavía, una tercera causa que da lugar a este tipo de comunicaciones. El científico, a veces, tiene que justificar que hace algo, si no para obtener su paga, sí para lograr que se le otorgue la mayor ayuda posible para sus investigaciones. Uno de los criterios más generales para juzgar la labor de un hombre de ciencia es el de sus publicaciones. Puesto que quien juzga es, en muchos casos, una persona que no pertenece al mismo campo del investigador, lo más sencillo es juzgar por el número de trabajos publicados. En estas condiciones, la mejor manera de resolver el problema puede ser: la nota preliminar. Por último, puesto que la presentación de un trabajo *in extenso* en un periódico científico requiere mucho tiempo y mucho esfuerzo, la salida fácil tiene que ser: la nota preliminar. En numerosas ocasiones, esta nota preliminar no pasó de ahí, o sea, no fue confirmada posteriormente por el trabajo experimental concienzudo.

Veamos ahora qué puede decirse acerca de la publicación de un trabajo en un periódico científico. Hemos dicho que esto no es tarea fácil.

Constituye, sin embargo, la mejor manera de dar a conocer actualmente, en forma útil, a un mayor número de investigadores, la contribución al conocimiento realizada por uno de éstos. Las preguntas por contestar son de dos tipos: 1. ¿Cuándo debe escribirse un trabajo científico?, y 2. ¿Cómo debe escribirse? No es fácil establecer reglas sobre estas cuestiones, excepto de índole muy general. Muchas veces, sin embargo, un consejo oportuno puede servir de catalizador para que un investigador joven escriba un trabajo que, sin este impulso, no hubiera surgido a la realidad. Las distintas disciplinas y los diferentes temas tendrían que tratarse por separado. Pueden, sin embargo, fijarse algunas reglas muy generales que, desde luego, serán principalmente aplicables a las ciencias biológicas experimentales.

1. *¿Cuándo debe escribirse un trabajo científico?* En la mayor parte de los casos, se ha empezado por la formulación de una hipótesis de trabajo en la que se trata de establecer una correlación funcional entre dos o más variables. Supongamos que el caso fue abordado según los lineamientos establecidos previamente, y que la situación es sencilla. Una vez planeada la situación experimental, se realizan los experimentos destinados a confrontar la hipótesis con los hechos. Ya se señaló antes, también, que la repetición de un experimento no va a aumentar la probabilidad de obtener resultados más precisos. Esto significa que hay que limitar a lo justo, el número de experimentos correspondientes al estudio en cuestión. El problema es señalar cuántos deben ser los experimentos que hay que realizar para completar un trabajo. Lógicamente, el trabajo quedaría completado cuando los hechos confirmaran la hipótesis planteada; de otra manera, tendría que modificarse esta hipótesis o tendría que formularse una nueva que, eventualmente, se confirmara al ser confrontada con la realidad. Una vez que los experimentos dan resultados claros, que conducen a la adquisición de una certeza de que la hipótesis de trabajo está de acuerdo con los hechos, no valdría la pena seguir repitiendo experimentos. Pero la adquisición de una certeza es puramente subjetiva y variará de acuerdo con la preparación del autor. Tal vez una regla que puede servir para determinar cuándo se ha adquirido tal certeza, es la de no ir más allá del momento en el cual se pueden predecir los resultados de un experimento. Mientras todo lo que se observe parezca nuevo, habrá que continuar haciendo experimentos y formulando hipótesis.

Es frecuente que en el curso del trabajo aparezcan hallazgos insospechados, con poca relación con la hipótesis de trabajo. Si estos hallazgos no modifican por sí mismos la hipótesis inicial, no será conveniente cambiar el rumbo de la investigación y dedicarse a la exploración de estos hechos nuevos, a menos que este estudio parezca de interés mayor que el que originó el plan inicial. Lo más cuerdo sería completar éste, y continuar posteriormente la investigación, siguiendo alguno de los nuevos caminos abiertos. Las desviaciones pueden dar lugar a que no se realice nunca nada

efectivo. De igual manera, a pesar de que los nuevos caminos encontrados en el curso de un estudio parezcan estar en íntima relación con el problema inicial, conviene tener presente que un estudio en el cual se pretendiera cubrir numerosos aspectos puede resultar muy complicado y desbaratarse con un fuerte soplo como sucede con un castillo de naipes. Lo que se quiere decir es que vale más satisfacerse con dar un solo paso, pero un paso en firme. Más tarde, se puede dar otro paso en firme en la misma, o en otra dirección, pero se irá avanzando. Mientras se asciende, escalón por escalón, se irá tratando de cubrir todas las hendeduras posibles; reforzándolas si es que alguien las encuentra o las hace notar. En otras palabras, hay que ir dejando bases firmes que puedan sustentar sólidamente al conocimiento nuevo, a una teoría de alcance general.

2. *¿Cómo debe escribirse el trabajo científico?* Supongamos, pues, que se formuló una hipótesis sencilla y ésta se confirmó al ser confrontada con los hechos; que se realizó el número suficiente de experimentos hasta el grado que ya se logró predecir el resultado. Entonces ya se habrá llegado al punto de tener que escribir el trabajo. La observación cuidadosa de los artículos publicados en una revista sería ayuda mucho para aprender el orden lógico en la presentación del material.

En primer lugar hay que exponer el problema, o sea, decir cuál fue la pregunta a la cual se quería encontrar la respuesta. Hay que señalar los esfuerzos anteriores, los pasos que se han dado para intentar la solución del problema, y la manera ideada que se ha planteado para resolver, aunque sólo sea parcialmente, el problema en estudio. Hay que describir los métodos empleados, en todos los detalles que puedan servir a otro investigador para emplear con fruto la misma preparación, aprovechando la experiencia adquirida que así se le brinda. No sería adecuado guardar en secreto alguno o algunos de los pasos importantes, ni callar otros por suponer que quedan sobreentendidos. Si los métodos no son originales, habrá que citar al autor y a la publicación en la que los describe y ahorrar, así, una segunda descripción. Es conveniente citar las modificaciones a las técnicas originales, aunque las alteraciones hayan sido pequeñas, y más adelante, en la discusión, explicar los motivos que indujeron a tales modificaciones y, eventualmente, discutir la posibilidad de que esta variación pudiera conducir a la obtención de resultados diferentes.

Describir los resultados empleando el tiempo pasado. No incluir en esta sección datos que no sean originales, ni siquiera con propósitos de comparación. Tratar de hacer una buena sistematización de los datos. Hacer grupos de ellos, y describirlos sucesivamente yendo de lo sencillo a lo complicado. Las ilustraciones limpias, bien proporcionadas, son un complemento indispensable. Preferir curvas a tablas numéricas cuando sea posible. En las curvas, ajustar las escalas de manera que la curva muestre cierta simetría, por ejemplo, una recta con inclinación de  $45^\circ$  y que parte del origen,

da mejor impresión estética que cualquiera otra recta. No emplear las figuras para ilustrar más de una característica o cambio. Procurar presentar controles (aspectos de un fenómeno sin que se cambien las variables en estudio) antes y después de ilustrar el cambio o variación inducido por la modificación de la situación experimental. El control final constituirá una prueba de que la preparación no ha sufrido cambios importantes con el tiempo.

En la discusión, hacer primero la confrontación de los datos presentados con la hipótesis de trabajo, y mostrar hasta qué grado estos datos se ajustan a ella y la comprueban. Al mencionar los hechos que apoyan la hipótesis o teoría, es un buen sistema referirse siempre a las ilustraciones o gráficas que se presentan; el lector adquiere así una idea más clara del valor de la prueba que esgrime el autor. Escribir esta parte de la discusión en tiempo presente del verbo. A continuación, pueden citarse las observaciones de otros autores que confirman o apoyan la hipótesis propia. Nunca deben dejar de citarse los datos que difieren o que no están de acuerdo con la idea presentada. Se tratará de explicar a qué razones pueden deberse las discrepancias. Es útil concluir con un bosquejo sobre la significación y trascendencia de los nuevos conocimientos adquiridos, y señalar los nuevos caminos que se abren a la investigación posterior. Para lo que no queda plenamente confirmado, y cuando las explicaciones que se presentan son sólo provisionales, hay que emplear el subjuntivo o condicional y los términos de: podría ser que, sería, es posible, etcétera.

En términos generales no se escribirá un trabajo para presentar resultados negativos. Tampoco es recomendable hacerlo sólo con el fin de criticar a otro autor: ni para decir que tiene razón porque se han confirmado los resultados por él obtenidos; ni para decir que no la tiene sólo porque se encontraron discrepancias entre sus datos y los que se están presentando. Uno de los postulados de la ciencia (ver pág. 41) establece que debe haber confianza en la honorabilidad de los demás hombres de ciencia. En la práctica esto es indispensable, puesto que nadie sería capaz de repetir todos los experimentos que se describen, sólo con el fin de confirmar las afirmaciones que encierran las comunicaciones científicas de los demás. Por último, un trabajo científico es un documento y debe conservar su carácter impersonal. Esto significa que no deben figurar en él las reacciones emocionales del autor ante ninguno de los aspectos del estudio, o ante las reacciones anteriores, o las que pueden ser anticipadas en otros autores.

D. R. ©, 1971 Centro de Investigación y de Estudios Avanzados  
Instituto Politécnico Nacional, S.E.P.  
México, D. F.

Impreso por EDITORIAL FOURNIER, S. A.  
Arquitectura 29, Copilco-Universidad  
México, 20, D. F.



*el  
método  
científico*

*Arturo Rosenblueth*

---

CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS AVANZADOS  
DEL INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL / MEXICO