

Prof. J. A. PÉREZ BUSTAMANTE
Catedrático de Química de la Universidad de Cádiz

ROBERT BOYLE: QUÍMICO, FÍSICO Y FILÓSOFO DE LA MATERIA

Boyle as a Chemyst, Physicist matter Philosopher

*«Las observaciones científicas tienen
que abrir paso a las interpretaciones me-
tafísicas y filosóficas.»*

B. LOVELL

En fechas recientes se ha cumplido el tercer centenario del fallecimiento de uno de los científicos que más han influido en el progreso metodológico y doctrinal de la química científica, rompiendo con su tradición aristotélica-iatroquímica, que significa un largo paréntesis alquímico que se extiende desde el Período Alejandrino hasta los estertores del Renacimiento, a través de un largo peregrinaje de mística y laboratorio durante unos 18 siglos. Boyle representa uno de los más significados artífices en el proceso de transformación que dará lugar en los dos siglos siguientes a una nueva química independiente y con suficiente contenido propio como para poder constituirse en una Ciencia Experimental.

En realidad, la obra filosófica de Boyle señala el punto de ruptura de una pseudociencia hacia un desarrollo científico, sistemático y racional, que tardaría aún más de cien años en cristalizar en lo que hoy determinamos *química científica* concretado todo ello en la *revolución química* de Lavoisier, acaecida en el último tercio del S. XVIII, que señala el segundo escalón significativo de acceso a la química tradicional —empírica y metafísica— a la categoría de una auténtica Ciencia Experimental.

Robert Boyle fue el décimocuarto hijo de Richard Boyle, primer conde del ducado irlandés de Cork, persona muy influyente y muy acomodada, que padeció las graves consecuencias de la revolución de Cromwell y las consiguientes guerras angloirlandesas, que afectaron gravemente a su patrimonio.

Robert Boyle fue un niño prodigioso, de salud precaria, que le afectó de modo considerable a lo largo de su vida. Recibió una educación muy esmerada y realizó frecuentes viajes a diversos países del continente europeo hasta que se asentó profesionalmente, primero en Oxford (1656), donde realizó importantes trabajos con la colaboración del eminente y polifacético científico Hooke, pasando a residir en Londres a partir de 1668, en casa de su hermana Lady Ranelagh, montando un laboratorio en la parte trasera del domicilio, situado en Pall Mall, que llegaría a convertir en un auténtico centro de investigación.

Boyle se orientó desde la medicina hacia la química dentro de su polifacética formación, que le permitió realizar un gran número de publicaciones en los campos de la física, química, filosofía y religión. Sobre él influyeron de modo muy especial los trabajos de Van Helmont, el empirismo metodológico preconizado por F. Bacon y las doctrinas mecanicistas-atomísticas de Descartes.

Los objetivos generales que se trazó Boyle se concretan en su reiterado afán de *liquidar el aristotelismo y las doctrinas iatroquímicas* en relación con el problema de la filosofía de la materia, así como en la experimentación con la materia para *demoler el edificio místico y metafísico de la química* de la época recurriendo para ello al racionalismo y al mecanicismo.

Junto con Hooke, Boyle fue uno de los fundadores de la Royal Society, que surgió del «Colegio Invisible o Filosófico», cuya constitución inspiró S. Hartlib. La carta fundacional de dicha institución fue promulgada por el rey Carlos II en 1664. Durante muchos años Boyle fue la personalidad más prestigiosa e influyente en la Royal Society, cuyo lema fundacional se contenía en el aforismo «*Nullius in verba*», llegando a ser propuesto presidente de la misma, honor que declinó Boyle por razones de incompatibilidad de sus creencias religiosas con el preceptivo juramento institucional.

Las contribuciones fundamentales de Boyle se centran en la elaboración de una nueva filosofía de la materia (elementos, atomismo corpuscular), estudio de los gases y muy amplia experimentación en química analítica, campo este en el que puede considerársele con toda propiedad como uno de los más significados fundadores de dicha disciplina, al tiempo que se constituyó en uno de los primeros adelantados del positivismo en la química.

El enfoque general de la obra de Boyle presenta dos facetas:

- *especulativa* (Filosofía Natural, Física, Química)
- *experimental* (Física y Química)

La obra escrita por Boyle es muy voluminosa y variada, presentando claramente los siguientes componentes:

- *tradicional*, fruto de su inmensa erudición.
- *experimental*, que describe minuciosamente el inmenso material, observaciones y conclusiones relacionado con las investigaciones, tanto propias, como de sus colaboradores.
- *informaciones diversas*, fruto de sus conversaciones y correspondencia con muchos tipos de personas (navegantes, viajeros, personas que le merecían «credibilidad», etc.).

La obra escrita de Boyle se comprendía nada menos que en 46 volúmenes de manuscritos, que le fueron legados a la Royal Society en 1770, generalmente conocidos como «The Boyle Papers».

La erudición de Boyle no resulta fácil de enjuiciar directamente, ya que su extensa biblioteca fue vendida por partes, no existiendo ninguna catalogación de la misma. Sin embargo, a través de las innumerables referencias y citas de sus contemporáneos en toda clase de publicaciones queda perfectamente clara la amplitud de sus conocimientos, que la propia obra de Boyle testimonia.

Lo que sí resulta en ocasiones muy difícil es diferenciar la totalidad de la obra personal de Boyle, como consecuencia del gran número de ayudantes y colaboradores que tuvo, muchos de gran significación y que poseen un importante historial científico propio.

En consonancia con la prolijidad tediosa de su amplia labor experimental, el estilo descriptivo que se advierte en los escritos de Boyle resulta con frecuencia abstruso, farragoso, verboso, ambiguo, subdividido y confuso, también como consecuencia de su afán de no comprometerse demasiado en sus afirmaciones. Estas características se advierten claramente cuando trata cuestiones relacionadas con la luz, el color, el fuego y los elementos químicos, que describe en términos antes físicos que químicos.

Tradicionalmente se considera a Boyle como el «padre» de la química científica fundamentalmente por las siguientes razones:

- la consideración de la química como una *ciencia física importante e independiente*, que no es meramente un arte práctico, ni una ciencia mística, ni una ciencia subsidiaria de la medicina (papel tradi-

cional, especialmente en el periodo iatroquímico, que concluye con Boyle)

- por la introducción del *método experimental* en la química
- por su definición clara, aunque cargada de contenido metafísico –por no haberse aventurado a concretarlo en relación con el mundo material– del *concepto de elemento*, asociado con la realización de un gran número de experimentos que invalidaron definitivamente los conceptos tradicionales aristotélicos e iatroquímicos sobre la cuestión (teorías metafísicas de elementos y cualidades y de principios generales).

También existen, no obstante, opiniones (p. e., C. Solís) de que la concepción de Boyle puede ser, en buena medida, de «parricida de la Química»... «según atendamos a sus doctrinas, o a lo que en la práctica hacía» (sic). Efectivamente, existen acusadas contradicciones y paradojas al respecto en el pensamiento y en la obra de Boyle, cuya filosofía mecanicista relegaba el fenómeno químico a un segundo plano, prestando atención prioritaria a procesos puramente físico-mecánicos. Efectivamente, la química se elimina en el programa de Boyle, quedando reducida a una parcela de la física, o «filosofía natural». Desde nuestra perspectiva actual podemos afirmar, sin embargo, que esta interpretación habla en favor de una concepción premonitrice muy avanzada por parte de Boyle, ya que el fenómeno químico no es en último término sino un aspecto físico de las perturbaciones de baja energía relacionadas con las capas electrónicas de valencia –las más externas– del átomo. En definitiva, la química se ocupa de la fenomenología del extrarradio, suburbio, periferia, o arrabal electrónico del átomo y, en consecuencia y en sentido amplio, puede quedar reducida, o integrada, como un aspecto particular de una concepción holística muy amplia, cual es la estructura atómica y los niveles energéticos relacionados con la misma, todo lo cual «*latu sensu*» no es sino física. Cuestión bien distinta y diferenciante es la relacionada con la finalidad y objetivos de ambas ciencias, que justifica sobradamente su diferenciación específica. Se trata, en definitiva de aclarar debidamente lo que atañe a la filosofía general de la materia (atómica, física) de lo que atañe a las manifestaciones concretas de la materia bajo determinados supuestos y condiciones (propiedades, transformaciones y fenómenos típicamente químicos). Esta dicotomía conceptual creo que permite comprender suficientemente gran parte de las aparentes contradicciones que presenta la obra filosófica de Boyle con respecto a su obra y enfoque puramente experimentales, en relación con la química.

Boyle se pudo permitir el privilegio de realizar la mayor parte de sus in-

vestigaciones a título particular, con la colaboración de otras personas, ayudantes o colaboradores, pagados por él mismo. Entre otros muchos, podemos citar aquí los nombres de colaboradores tan significados como fueron Hooke (muy especialmente), Locke, Papin, Homberg y Hanckwitz; todos ellos brillaron con luz propia.

Boyle fue hombre de convicciones religiosas muy profundas, tolerante y modesto, que antepuso su vocación científica a toda tentación honorífica, o lucrativa.

A diferencia de su coetáneo y gran amigo, el genial I. Newton, Boyle le prestó poca atención a las matemáticas, lo que probablemente fue una ventaja en relación con su obra química experimental, pues, de modo paradójico, el empeño de Newton de matematizar la química (tanto a la filosofía de la materia, como al propio experimento químico) no le condujo a ninguna parte; de ahí el curioso y sorprendente silencio de Newton en relación con la química y la alquimia, a las que dedicó muchísima atención, tanto filosófica, como experimental (escasamente conocida, por inédita).

Hecha esta imprescindible introducción de nuestro personaje pasaremos en lo que sigue a considerar de modo esquemático y breve las aportaciones fundamentales de Boyle a la Ciencia.

En el campo de la *biología*, la aportación fundamental de Boyle puede considerarse que fue la introducción de la técnica de conservación de muestras biológicas húmedas en alcohol.

Entre sus aportaciones a la *física*, tan numerosas como importantes, solo o en colaboración, podemos citar las siguientes:

- Descubrimiento de la *primera ley fisicoquímica* cuantitativa, aplicada a los gases ($PV=k$), de enorme trascendencia para el posterior estudio de los estados de agregación, la teoría cinética de los gases y el establecimiento de un nexo unificador entre el estudio de la materia macroscópica y la atomística. Esta ley fue establecida por Boyle, Hooke y Townley en 1664, sin que sus autores le prestasen, paradójicamente, la debida importancia a este descubrimiento. La ley fue reformulada en 1676 por Mariotte, fijando el parámetro de la temperatura, sin que el redescubridor alegase reivindicación alguna de prioridad. Dicha ley ha pasado a conocerse como la ley de Boyle-Mariotte.
- demostración de la hipótesis de Galileo referente a la *caída de los cuerpos* con igual velocidad en el vacío, independientemente de su masa y densidad
- demostró la no propagación del *sonido en el vacío*, explicando que el sonido consiste en un movimiento vibratorio que sólo tiene lugar en

el seno del aire. Tal conclusión, unida a la anterior, así como sus comprobaciones experimentales de los experimentos barométricos de Torricelli y de vacío de Guericke le suministraron pruebas irrefutables para proceder a la demolición de algunas de los dogmas aristotélicos más consagrados a través de los tiempos.

- Demostró el carácter permanentemente *elástico del aire* («muelle de aire») aplicable a todos los gases (implícitamente, dado el estado de subdesarrollo de la física y química neumáticas de la época).
- En relación con el *calor*, Boyle asumió la teoría de Bacon («Novum Organon», 1620) considerándolo una forma de movimiento. Sin embargo su interpretación general del fenómeno fue esencialmente errónea, tanto desde un punto de vista mecanicista (ignoró la influencia de la temperatura), como de su concepto (lo consideró ponderal y corpuscular). Por otra parte, Boyle fue seguidor de la teoría mecanicista de Descartes («Principia Phylosophiae», 1644) acerca de la existencia omnipresente del *éter*.
- *filosofía de la materia*: Siguiendo muy de cerca los presupuestos de Descartes, Boyle intentó hallar una teoría *experimental* mecanicista, particulada (corpuscular) y lógica de la materia del universo. El estado rudimentario de la ciencia y de la técnica de la época le impidió llevar a cabo la correspondiente comprobación experimental.
- demostró que muchas frutas y vegetales contienen «aire», que libran en los procesos de *fermentación*. Dicho «aire», se relaciona evidentemente con el así denominado «aire fijo» (CO₂) que pondría de manifiesto en el siglo siguiente el eminente investigador escocés Black. Este constituye un claro caso de confusionismo para Boyle entre lo que es un fenómeno físico (aire adsorbido, o absorbido) y un fenómeno químico (producción de un «aire» como consecuencia de una reacción química).
- utilizó la técnica de *destilación a presión reducida* y empleó *mezclas frigoríficas* (HNO₃ + nieve) en diversos tipos de experimentos (investigación del «frío», que no consiguió interpretar ante la incapacidad de diferenciar si se trataba de algo positivo, con existencia propia, o negativo, como falta de calor)
- Desarrolló el *análisis físico de materiales* realizando muy numerosas medidas de densidad recurriendo a la metodología de la balanza hidrostática, propuesta por Arquímedes y utilizada por los árabes, desarrollando un nuevo modelo de instrumento perfeccionado con el que realizó mediciones de numerosos metales, minerales y compuestos químicos, de muy considerable exactitud. También utilizó para

estos fines el picnómetro («botella de densidad»). La exactitud de sus medidas se vio afectada en ocasiones por la insuficiente pureza de los materiales analizados; la precisión que alcanzó fue del orden de 0,3 ppm alcanzando sensibilidades de 3 mg. en pesadas de 93 g.

En el campo de la *química*, la labor de Boyle reviste especial significación, tanto por lo que se refiere al estudio de los fenómenos de combustión, respiración animal, calcinación de metales (experimentación muy amplia y valiosa, aunque de interpretación generalmente desafortunada), experimentos muy variados y positivos en el ámbito de la química, en general, y de la química analítica, en particular, estudios y observaciones pioneras en análisis clínicos, etc.

En lo que sigue pasaremos a considerar y comentar brevemente lo más significativo de la *obra química* de Boyle:

- Estudios de *combustión*. Demostró que el aire es necesario para el mantenimiento de la llama y de la vida (respiración).
- Estudios de *calcinación de metales*. Boyle advirtió, como otros autores antes, el incremento de peso que experimentan los metales al arder para dar origen a las correspondientes «cales» (óxidos) elaborando una teoría (errónea) según la cual dicho incremento de peso se debería a la fijación por el metal de partículas de fuego, que atravesarían las paredes (metálicas, o de vidrio) del recipiente. Dicha teoría fue refutada por Cherubin d'Orleans, Kunckel y Boerhaave, entre otros, mediante diversas pruebas experimentales (p. e., el peso del metal es el mismo en frío, en caliente o al rojo vivo; la densidad del metal no varía frente a la acción del fuego, etc.).
- En contra de lo que a veces se afirma, Boyle no fue un descubridor independientemente de Brand (1669) del *fósforo*, que fue introducido desde Hamburgo a Inglaterra en 1677 por Krafft, amigo de Je Brand, amigos ambos también de Kunckel, quien deslealmente intentó apropiarse la prioridad de dicho descubrimiento que le fue revelado liberalmente a Kunckel y a Krafft por el propio Brand. En 1678 Boyle presentó una comunicación sobre el fósforo en favor de Brand, desvelando así el claro intento oportunista de Kunckel. Boyle realizó, sin embargo, importantes observaciones en relación con su meticoloso estudio del fósforo, demostrando que sólo luce en presencia de aire, observando, además, que la explosión prolongada del elemento al aire original un fuerte olor, diferente del mostrado por los humos visibles que se forman al exponer el fósforo a la ac-

ción del aire, anticipando así —bien que de modo cualitativo y organoléptico— el descubrimiento del ozono por Schoenbein (1840). Boyle investigó, además, las propiedades del ácido fosfórico. Finalmente, Boyle elaboró un procedimiento de obtención del fósforo, a partir de la orina igualmente, más sencillo que el utilizado por Brand.

El destacado colaborador de Boyle, G. Hanckwitz desarrolló un procedimiento comercial de fabricación de fósforo, que exportó al continente europeo para cubrir la demanda que del mismo existía por parte de diversos.

- Boyle prestó escasa atención al *hidrógeno* (cuya producción ya fue observada anteriormente por Paracelso), al que denominó «aire facticio» (artificial), que obtuvo atacando limaduras de hierro con ácidos, sin preocuparse por la naturaleza de dicho gas, cuyo descubrimiento «oficial» tendría que esperar aún un siglo (Cavendish, 1766) al tiempo que cambiaría su nombre por el de «gas inflamable».

Por lo que a su trascendental *obra analítica* se refiere, el nombre de Boyle se asocia con un gran número de hechos y observaciones importantes, que pueden resumirse en lo siguiente:

- introductor de *neologismos* consagrados («análisis», «analizador», «analítico»).
- desarrolló en gran medida el *análisis químico inorgánico* (empleo de H_2S); precipitación de cloruros y sulfatos de diversos elementos; ensayos de cobre con NH_3 y de hierro con tinturo de agallas; ensayos de coloración a la llama para el cobre; esquemas de análisis físico-químico de aguas minerales; estudios con indicadores ácido-base ampliando los estudios y observaciones realizados, o iniciados, por Van Helmont, Tachentius, Lemery y Kunckel; pionero en la utilización de reacciones colorimétricas con fines analíticos cuantitativos, en la utilización del complejo tetramincúprico como indicador ácido-base inorgánico, del H_2S como precipitante de metales, en el empleo y descripción del primer tipo de indicador ácido fluorescente mediante el extracto del «lignum nephriticum», en el empleo del $AgNO_3$ para detectar pequeñas impurezas de ion cloruro en aguas potabilizadas a partir de aguas marinas, en la realización de la primera reacción a la gota conocida para detectar pequeñas concentraciones de hierro mediante tintura de nuez de agallas estableciendo el límite de detección de la reacción, etc.
- pionero de la *química analítica clínica* (análisis fisiológico de sangre

siguiendo a Needham (1675) estando a punto de descubrir la presencia de hierro en la misma

- análisis de *impurezas en el aire* (detectó la presencia de partículas de agua, sales y azufre)
- *contribuciones diversas* (deshidratación del alcohol empleando K_2CO_3 : obtención de metanol por destilación de la madera y de acetona a partir del «azúcar de saturno» (acetato de plomo); estudió las reacciones coloreadas de diversos jugos vegetales por la acción de ácidos y álcalis, que clasificó como sustancias ácidas, volátiles («azufrosas») y «fijas» (alcalinas); elaboración de una receta para la preparación de agua sulfhídrica, etc.
- estudios de la *salinidad marina*, mediante la combinación de medidas físicas picnométricas con determinaciones químico-analíticas de cloruros, que le permitieron realizar la entonces importante observación de que el agua del mar no contiene NaCl únicamente en las capas superficiales
- *análisis por el fuego*, que le permitió concluir que el fuego no constituye un recurso fiable para la separación de los compuestos de sus elementos, a partir de observaciones realizadas sobre la formación de esmaltes por fusión, la estabilidad del vidrio frente al fuego y la destilación de aceites esenciales. Tal conclusión reviste especial importancia teniendo en cuenta la opinión contraria, muy generalizada en la época.
- Boyle prestó muy especial atención al el experimento de Van Helmont, *crucial* en la historia de la Ciencia, obsesionado por la relación que podría existir entre la «evidencia experimental» (bien falaz, como el tiempo ha demostrado) y la hipótesis de Van Helmont acerca de la posible institución del agua como elemento básico (y único) constitutivo de la materia. Resulta interesante hacer constar que Boyle dedicó mucha atención a esta cuestión a través de una externa experimentación propia, que incluía un perfeccionamiento esencial para la aceleración del experimento, cual fue el recurso al cultivo y crecimiento de plantas sin utilizar tierra como base, sino que recurrió a la técnica *hidropónica* (empleo de disoluciones nutritivas; proceso de máxima rapidez de crecimiento de todos los ensayados), que fue utilizada por vez primera por Bacon. Tales experimentos fueron llevados a cabo paralelamente también por Sharrock, con el que coincidió y estableció amistad Boyle en su época de Oxford. Hay que decir que los satisfactorios resultados obtenidos por Boyle en este tipo de experimentación, enfocada exclusivamente hacia el análisis de la validez

de la teoría de Van Helmont sobre la materia, no influyeron prácticamente nada sobre el ulterior desarrollo de las propias teorías de Boyle al respecto.

Sin embargo, a pesar de la variedad y número de las investigaciones y descubrimientos realizados por Boyle, su nombre ha pasado inmortalizado a la historia de modo muy especial a través de la publicación de su obra cumbre y revolucionaria *The sceptical chymist*, publicada en 1661, que alcanzó muchas ediciones en diversos idiomas en diversas épocas, incluido el siglo actual. Este libro constituye un auténtico hito histórico en el desarrollo del pensamiento químico, a pesar de las ambigüedades, dudas y precauciones expositivas que su autor manifiesta a través de su prolijo y farragoso estilo literario, que describe nuevos conceptos filosóficos sobre la materia basados en el comentario de infinidad de experimentos de laboratorio, que Boyle aporta para refutar la base conceptual aristotélica, escolástica y iatroquímica de los elementos y principios comunes que constituyen la materia.

En esta obra, planteada a modo de diálogo platónico entre un defensor del aristotelismo (Themistius), un defensor de la teoría paracélsica de la «tríada prima» (Philoponus), un químico escéptico (Carneades) y un investigador independiente, que actúa a modo de árbitro, o moderador (Eleutherius), Boyle llega —aportando un gran número de pruebas experimentales, que analiza y discute a través de la polémica entre los cuatro personajes citados— al concepto de *elemento*, que define como:

...«yo entiendo ahora como elementos ... determinados cuerpos originales y sencillos, o totalmente sin mezclar; comoquiera que ninguno está hecho de otro, u otros cuerpos, son pues los componentes que integran directamente todos los denominados cuerpos totalmente mezclados, que, a su vez, volverán a resolverse en aquellos primeros...»

Después de enunciar esta especulación, el autor se refugia cautelosamente en el escepticismo, contradicción, o duda, diciendo:

...«ahora bien, lo que ahora pongo en tela de juicio, es que haya tales cuerpos, que se encuentran constantemente en todos y cada uno de aquellos que se consideran cuerpos compuestos de elementos...»

Consecuentemente con estas manifestaciones, Boyle no quiso comprometerse indicando qué sustancias conocidas eran claramente elementos, observando así su habitual actitud, mezcla de prudencia y de ambigüedad.

Como criterio de enjuiciamiento de la elementalidad de una sustancia Boyle recurrió al análisis químico, sin descartar la posibilidad de que su ulterior perfeccionamiento podría demostrar que lo que inicialmente era considerado como un elemento podría mostrarse como una sustancia compuesta, introduciendo así una metafísica adicional de escepticismo, supeditada al refinamiento metodológico e instrumental.

La filosofía mecanicista-corpúscular atomística de Boyle se fundamentaba en los siguientes supuestos básicos:

- Concepto de *partículas mínimas*, indivisibles (no totalmente epicúreo) de *una única materia* (en lugar de elementos, o principios básicos) primigenia.
- Las diferentes sustancias difieren en la *forma* o manera de colocarse las más pequeñas partículas de dicha *materia prima*, o primigenia
- Los *elementos* están constituidos por grupos de partículas materiales, que se mantienen muy fuertemente unidas («clusters», o cepas), que se conservan invariables a través de cualquier tipo de *reacción química*

Ninguna referencia se hace en esta teoría a cualquier implicación con el calor, o con la temperatura, conceptos que Boyle no tenía claros, como la inmensa mayoría de los científicos de la época.

Basándose en Gassendi, Boyle intentó llegar a alguna solución de compromiso entre las teorías atomísticas (Demócrito) y de los «*minima naturalia*» (Aristóteles) griegas postulando que la *especificidad* de las partículas materiales la determina la existencia de *corpúsculos*, de *texturas* y de *estructuras* (superando así la concepción atómica desordenada de Demócrito).

Según Boyle, «los *compuestos químicos* pueden imaginarse como la asociación de varias *texturas* que se reorganizan en *estructuras* a través del movimiento de los *corpúsculos* materiales». De esta forma, Boyle concluye con la polémica secular acerca de la *unión* de los elementos para formar compuestos químicos, que preside su filosofía conceptual definitoria del *elemento*:

- perfectamente *homogéneo*
- totalmente *simple*

A través de la organización de las partículas materiales en estructuras determinadas intenta explicar Boyle la *henosis* (combinación química) aristotélica, como consecuencia de la originación de una *mixis* (compuesto químico) aristotélica.

Con estas especulaciones pretende Boyle superar las viejas doctrinas de los *rizomas* (materiales básicos constitutivos de la materia), que considera la existencia de un número reducido de *elementos* (rizomas), o *principios*, que se hallarían presentes *todos* en *todos* los materiales.

Lo que Boyle se pregunta, una y otra vez, a través del «Químico Escéptico» es qué clase de materiales son los elementos *intrínsecamente* y en relación con *otros materiales*, planteándose para ello un cierto número de cuestiones fundamentales, tales como:

- ¿existen realmente elementos, o principios de la materia?
- ¿por qué razón, en caso afirmativo, han de existir únicamente 2, 3, 4 o 5 elementos, o principios?
- ¿existe algún medio de establecer si un material es simple, o compuesto?
- ¿se puede considerar al fuego como analizador general de todos los cuerpos?
- ¿son los productos del calentamiento realmente elementos, o principios?

Por lo que hasta aquí va expuesto, cotejado con la experiencia, podemos concluir que el tiempo ha dado la razón a Boyle, en relación con el cambio semántico de *elemento*, por él propuesto, que se decanta en dos conclusiones:

- una *proposición metafísica* (formulación posibilista, no concretable experimentalmente en relación con la realidad física del mundo que nos rodea)
- una *definición analítica* (la existencia confirmada de los elementos químicos queda supeditada a su demostración experimental, por otra parte revisable, en función del perfeccionamiento progresivo y previsible de la metodología analítica)

En el momento de su aparición, las teorías de Boyle fueron objeto de inmediata atención y curiosidad científica, pero no trascendieron, ni dieron lugar a ningún cambio científico revolucionario. Sería necesario esperar más de un siglo hasta que Lavoisier diera el siguiente paso, basado esencialmente en las argumentaciones fundamentales de Boyle introduciendo la novedad de considerar especialmente los *cuerpos simples*, con preferencia al concepto de elementos químicos.

Además, Lavoisier siguió a Boyle en el criterio experimental a tener en

cuenta para dilucidar el carácter elemental de un cuerpo, o sustancia, recurriendo para ello al *criterio analítico*. Al igual que Boyle, también Lavoisier fue precavido y escéptico, por ejemplo en el caso de las «cales» alcalinas y alcalinotérreas, al no descartar la posibilidad de que el análisis podría demostrar su naturaleza real de compuestos químicos y no de elementos, o «cuerpos simples» como él prefirió considerarlos en su histórica clasificación en cinco grupos.

Las opiniones generalizadas que atribuyen a Boyle un exceso de física-lismo, en detrimento del concepto químico de la materia, están plenamente justificadas, pero también resultan fácilmente comprensibles, ya que la nebulosa metafísica con la que siempre se ha presentado tan espinosa cuestión, subsiste incluso hoy: La insistencia *corpúscular* de Boyle, con preferencia al átomo griego, o a la partícula cartesiana conduce inexorablemente a la coincidencia del *elemento físico* con el *elemento químico*, máxime postulando — como lo hizo Boyle — que todas las propiedades de las sustancias se derivan de las de sus partículas constitutivas. Incluso en la actualidad persiste, de modo generalizado, el confusiónismo conceptual entre el aspecto físico y químico de la materia, que requiere tener bien presentes algunas consideraciones fundamentales:

- el *fenómeno químico* no es sino una pequeña parcela de la «personalidad holística» del átomo (fenómenos que implican bajas energías en la periferia electrónica del átomo, concretamente en la así denominada «carga de valencia»)
- La *finalidad* de ambas ciencias, la Física y la Química, es bien distinta, aunque ambas tengan el mismo *objeto* (la materia) y se complementen en múltiples aspectos dentro de una interacción permanente y reversible implicando *experimento-teoría*.
- La *visión conceptual* de la materia, así como los propios *lenguajes*, de la física y de la química, son muy distintos
 - La Química presta especial atención a la *parte* de la materia que le incumbe (la periferia electrónica del átomo), mientras que la Física intenta *penetrar* en el concepto y en la realidad absoluta de la cuestión (partículas más elementales, incluso «primigenias», si es que tal cosa existe; fuerzas; campos; energía y radiación)
 - La *Química* presta atención preferente a los aspectos tradicionales *macroscópicos* y más *intuitivos* de la materia (propiedades; cualidades descriptibles, perceptibles y de reconocimiento más inmediato y directo). En cambio, la Física intenta *describir*, que no percibir o visualizar, la evanescente metafísica cósmica de la esencia *absoluta* de

la materia. En consecuencia, podemos considerar que el *enfoque químico* de la materia, es, ha sido y, forzosamente seguirá siendo más restringido, más concreto, más superficial y más incompleto que el *enfoque físico* de la cuestión, más abstracto, más completo, tendiendo hacia el esclarecimiento absoluto de una cuestión esencialmente huidiza e interminable, cual es la *verdadera esencia* de la materia.

Tan divergentes finalidades, enfoques, conceptos y amplitud del objeto investigado podrían, quizás, justificar una generalización diferenciadora de esta temática distinguiendo los aspectos conceptuales de *materia química* y *materia física*, aunque nos estemos refiriendo a un mismo átomo, del que cada una de estas Ciencias habla de *materia* en términos semánticos esencialmente diferentes y, adicionalmente, equívocos, cuando se entremezclan ambas acepciones (materia física, o materia química), como se hace normalmente.

Es evidente que resulta imposible diferenciar el aspecto físico del aspecto químico de la materia si no se conoce la *estructura fina* (íntima) del átomo, que origina automáticamente la «desmaterialización conceptual», intuitiva, que tenemos de la misma. Tal cuestión ha sido totalmente ignorada —por muy obvias razones— desde el atomismo griego hasta las décadas finales del siglo XIX.

Por tal motivo, el tratamiento químico tradicional de la materia no podía basarse en otra cosa que en la consideración de algunos de sus atributos medibles (propiedades o «cualidades») relacionando cada medición específica con la singularidad elemental química. Los intentos de relacionar los aspectos macroscópicos y atomísticos de la materia en el S. XVII estaban condenados «A priori» a un seguro fracaso, en razón a las limitaciones experimentales de la época. Así, Newton fracasó al intentar aplicar un tratamiento matemático a la dinámica del fenómeno químico a nivel atomístico, en línea con lo que a nivel macroscópico había conseguido llevar a cabo con el desarrollo de la mecánica celeste, mientras que Boyle fracasó también al intentar explicar en términos de su teoría corpuscular la fenomenología experimental química de la materia macroscópica.

Podemos concluir, pues, que Boyle no pudo lógicamente resolver un problema ya planteado 21 siglos antes por Epicuro al diferenciar como *categorías de la materia* bien distintas los aspectos perceptible (sensorial, intrínseco, macroscópico, continuo) e imperceptible de la misma (abstracto, discreto, atomístico) lo que, evidentemente le impidió *demonstrar* su teoría corpuscular (atomística) en base a su experimentación de laboratorio (macroscópica).

Además, la hipótesis atomística presenta una dificultad esencial, que no había escapado a la atención de Boyle relacionada con su hipótesis (heredada del más rancio atomismo griego) de que los átomos permanecen inalterados en sus combinaciones químicas, es decir, mantienen su personalidad específica. Tal creencia suponía que las propiedades de los compuestos fueran un resultado aditivo, o promedio, de las propiedades de sus elementos constituyentes, lo que no es el caso y no dejaba de intrigar profundamente a Boyle, al considerar, por ejemplo, la desaparición de las llamativas propiedades de los ácidos y los álcalis al combinarse para dar lugar a la formación de sales. Esta dificultad interpretativa, como indica W. Ostwald a principios del presente siglo ...«no ha podido ser explicada hasta el presente, si bien nos hemos llegado a habituar a esta contradicción, hasta un punto tal que ya no nos preocupa».

Aristóteles, protagonista principal del enfoque *ortodoxo* tradicional de la otra filosofía de la materia (no atomística; elementos o principios que imprimen «formas» sobre una materia prima indiferenciada actuando a través de sus cualidades) propuso una explicación metafísica para tal cuestión, asumiendo que en la *mixis* (compuesto químico) se mantenía en algún grado la «potencialidad» (identidad, propiedades) de las sustancias de partida que entraban en reacción a través del proceso de la *henosis* (combinación química).

Comentario final crítico sobre el significado de la obra de Boyle

La personalidad y el alcance final de la obra de Boyle presentan considerables problemas de enjuiciamiento objetivo, dadas las características personales del protagonista, la enorme amplitud de su labor experimental y los grandes logros y también fundamentales errores asociados con dicha actividad y con la interpretación de muchos resultados involucrando teorías inde demostrables, prejuicios sostenidos y errores conceptuales importantes, agravado todo ello por el peso de una historia de mala imagen para la química, inexistencia de medios experimentales adecuados, carencia de un mínimo de cientifismo químico tradicional, etc.

El nombre de Boyle está presidido por una aureola de gran importancia para la Química, aunque no son muchos los químicos capaces de discernir lo más positivo de su obra de los numerosos aspectos más negativos y criticables de la misma. Sobre Boyle se ha escrito mucho y se seguirá escribiendo, por razones plenamente justificadas.

Tradicionalmente, para muchos Boyle ha sido considerado como el «pa-

dre» de la química moderna, mientras que actualmente se es más cauteloso con el calificativo y se le sigue considerando como «uno de los padres» de la química científica, a la luz de un mayor y mejor conocimiento del auténtico significado de su obra, cuyos méritos superan ampliamente a sus limitaciones y errores.

Para comprender debidamente el protagonismo químico de Boyle hay que ser consciente del significado que supuso la evolución de la química iatroquímica del S. XVI y primera mitad del S. XVII hasta la revolución química de finales del S. XVIII, atravesando una muy compleja interfase de transición del empirismo tradicional, asociado con un mística alquímica, hacia lo que hoy se entiende como lo que es la química, considerada como una Ciencia Experimental, ajustada a una metodología científica en la que se funden el experimento y la teoría.

El papel de Boyle en esta transición fue fundamental, muy superior al de cualquier científico de su época considerado aisladamente, tanto por lo que hizo, como por lo que propuso, inició o insinuó. La verdadera dimensión científica de Boyle ha de buscarse, ante todo, en el rupturismo del enfoque de su actitud, de sus teorías y de su metodología experimental en relación con la química frente a sus derroteros tradicionales, fundamentalmente empíricos, alquímicos y subordinados a otras disciplinas.

Es evidente que tal *revolución*, de enfoque y concepto, no la podía llevar a cabo una sola persona por sí sola, como es evidente que tal proceso no podía materializarse de la noche a la mañana. Lo que sí puede asegurarse es que fue Boyle el protagonista más significado del inicio de tal revolución, que se prolongaría durante más de un siglo hasta cristalizar en la revolución química de Lavoisier, como fruto final de una evolución experimental incesante de la química durante el período flogístico-neumático protagonizada por un número relativamente reducido de grandes químicos experimentadores, que realizaron muy numerosos e importantes descubrimientos.

Así pues, tanto el papel de Boyle, como el de Lavoisier fueron cruciales, cada uno en su época, considerando debidamente la situación general y las circunstancias específicas de cada momento. Tal realidad nos permitirá evitar incurrir en tan injustificadas, como inútiles, comparaciones valorativas sobre el mérito relativo de las respectivas contribuciones a la Química.

Dicho esto, pasaremos a analizar en lo que sigue y brevemente, los aspectos más destacables de la obra de Boyle, tanto positivos, como negativos, sin perder de vista en ningún momento el carácter pionero y rupturista que, frente al pasado, representa la actitud científica de Boyle, que pretendió hacer y consiguió hacer de la Química una nueva Ciencia Experimental, independiente y con entidad propia.

Al lector interesado en profundizar en estas cuestiones le recomendaremos, de modo especial, la lectura atenta y pausada de la excelente monografía de *Marie Boas*, incluida en la bibliografía del presente artículo.

a) *Logros más destacables*

Boyle personifica la aparición de un nuevo concepto de la Química, inaugurando una nueva era en la Historia de la Ciencia, al separarla por completo de la Medicina, constituyendo a la Química en una rama importante e independiente del estudio de la Naturaleza. Así pues, el empeño de Boyle busca hacer de la Química una *ciencia* respetable, apta para su inclusión en la «Filosofía Natural», desligándola de la mística alquímica tradicional, así como de su servidumbre «iatroquímica» a la Medicina. Para ello,

- intentará sustituir a la metafísica alquímica por una *filosofía científica* racional y basada en el trabajo experimental.
- a través de su *filosofía corpuscular de la materia* Boyle intentó eliminar todo tipo de ocultismo en la química, renunciando pragmáticamente —a diferencia del proceder de Descartes— a entrar en el problema metafísico de la definición de la materia, limitándose a intentar explicar sus experimentos en términos de materia y movimiento mecánico, postulando para ello que las diversas *formas* de la materia se derivan únicamente del tamaño, forma y movimientos de corpúsculos materiales de una única materia primigenia. De todo ello puede inferirse que para Boyle el aspecto *físico* de la materia estaría constituido por corpúsculos de una misma sustancia material, mientras que la estructuración final de los mismos, según formas, tamaños y movimiento conduciría a algo equivalente a nuestros actuales conceptos de elementos atómicos y moléculas, es decir a lo que es la *materia química*, simplemente *formas* estables de agregación («estructuras» y «texturas») *de una materia absoluta común particulada, la materia física*.
- seguirá fielmente las directrices metodológicas baconianas utilizando el *experimento científico* como medio de confirmar sus teorías y de ampliar conocimientos.
- será pionero en la creación de un laboratorio químico de investigación rodeándose de competentes *colaboradores*.
- impulsará decisivamente la creación y promoción de la *Royal Society*, de la que Boyle será su figura estelar.

- llevará a cabo una feliz *integración de la química con la física*, prestando similar atención al análisis y descripción de las sustancias a través de ambos tipos de propiedades.
- prestará especial atención al empleo científico de la *balanza* para el seguimiento e interpretación de las reacciones químicas preocupándose por utilizar balanzas de «ensayador de metales», con preferencia a las tradicionales balanzas farmacéuticas, para mejorar la calidad de las mediciones.
- establecerá claramente la insuficiencia del *fuego*, tradicionalmente consagrado, para el análisis de la materia, introduciendo, complementariamente, un gran número de *ensayos de identificación* química, además de una *metrología física* específica
- llevará a cabo una *sistematización metodológica* para el estudio *físico-químico* de las sustancias, combinando métodos químicos de análisis y síntesis, en la medida posible

Puede asegurarse que, a pesar de sus confusionismos conceptuales y errores interpretativos, la influencia de Boyle sobre la química del siglo siguiente fue especialmente notable en relación con la aplicación de técnicas físicas a la resolución de problemas químicos, así como en relación con el conocimiento de la composición química de las sustancias. Además, Boyle fue un pionero de la metodología química cuantitativa, que experimentaría un impulso creciente a lo largo del S. XVIII.

b) *Insuficiencias y errores*

Un aspecto especialmente paradójico de la obra de Boyle lo constituye el fundamental contraste que se observa entre la meticulosidad, sistematismo y destreza de su trabajo experimental, que contrasta flagrantemente con el estilo de sus escritos, desordenados, prolijos, incompletos, repetitivos, heterogéneos, incluso contradictorios en el contexto de su actitud básicamente escéptica, que buscaba no incurrir en riesgos evitables, especialmente cuando trataba cuestiones de interpretación comprometida. Es muy posible que el número excesivo de cuestiones variadas a las que dedicó su interés influyera negativamente sobre tal aspecto. De hecho, Boyle abrigó la intención de escribir una obra integral sobre «Filosofía Química», que nunca llegó a ver la luz. Si tal propósito se hubiera materializado es muy posible que se hubieran podido disipar muchas de las sombras y discontinuidades que refleja la voluminosa bibliografía del autor.

En lo que sigue se hará un breve comentario puntual sobre los aspectos más problemáticos, o contradictorios, de la obra de Boyle:

- En *química neumática* la labor de Boyle favoreció claramente la transición desde Van Helmont –cuajada de aspectos metafísicos alquimistas; «espíritus y fermentos vitales»; «arqueos», etc.– hacia el S. XVIII (composición del aire, obtención de nuevos gases, fenómenos de respiración, combustión y oxidación, etc.) y ello a pesar de su erróneo concepto propio acerca de la naturaleza del aire al que consideraba como un «fluido elástico inerte», en cuyo seno flotaban especies reactivas extrañas, responsables de las propiedades químicas del mismo. Boyle, de hecho, nunca tuvo clara la relación entre el aire atmosférico y los aires «facticios» (artificiales) como el hidrógeno y el dióxido de carbono, al igual que le ocurrió a todos los científicos del S. XVII.
- lo anterior explica perfectamente la preferencia de Boyle en considerar al fuego como principal protagonista en los fenómenos de *calcificación* (incorporación de «partículas de fuego» por los metales), ignorando totalmente el papel del aire, al igual que lo hacía al considerar a la *llama* como una entidad química, prejuiciado así irremediablemente por su propia teoría corpuscular.

Todo ello se explica perfectamente con el concepto bidimensional de la química de la época, que únicamente consideraba las reacciones entre estados de agregación sólidos y líquidos, considerando al aire como una especie de «éter soporte», mero portador, a lo más, de especies reactivas extrañas.

- presenta un especial interés la actitud de Boyle frente al tradicional problema de la *transmutación metálica*, que consideró posible, no en base a consideraciones de la metafísica de la mística alquímica, sino como directa consecuencia de su propia teoría corpuscular de la materia, ya que para Boyle el cambio de una especie metálica en otra no representaba otra cosa que un cambio estructural corpuscular de un único tipo de materia. Para Boyle el concepto de transmutación no implicaba transformación de un tipo de materia en otro, sino la obtención de un nuevo elemento químico a través de la modificación estructural de corpúsculos elementales de un mismo tipo de materia física, fundamentalmente ajustado a nuestro actual concepto de transmutación, que no implica un cambio de esencia material, sino una redistribución de los mismos elementos estructurales

terial, sino una redistribución de los mismos elementos estructurales básicos implicando un cambio estructural, sin entrar en consideraciones adicionales (número de partículas, o corpúsculos involucrados; fuerzas de unión, etc.).

No obstante, a pesar de la admisión de la posibilidad lógica y química de tal proceso, Boyle no dejó de considerar que se trataba de un proceso químico complicado y difícil de lograr.

Al igual que otros destacados científicos de los S. XVII y XVIII, también cayó Boyle en la trampa que presentaba la interpretación de la supuesta transformación del agua en tierra a través del experimento clásico de someter al vidrio a la acción prolongada del agua en ebullición, cuya interpretación inequívoca habría de esperar a la intervención de Lavoisier en la cuestión.

- A pesar del interés mostrado por Boyle en intentar eliminar toda forma de ocultismo, también incurrió de alguna manera en dicho error al considerar como una realidad la propiedad de los cristales y minerales de emitir *efluvios*, condicionantes de sus propiedades.
- Sin ningún género de dudas, las contradicciones y el escepticismo de Boyle alcanzan su «clímax» en su más celebrada obra «The sceptical Chymist», plagada de discusiones enrevesadas y farragosas, con pérdida frecuente del hilo conductor de su argumento base, en relación con su teoría de los *elementos químicos*, cuya definición era esencialmente correcta, aunque cuajada de reservas mentales acerca de su realidad física.

Así, como sugerencia alternativa a la posibilidad de existencia de unos pocos elementos, presentes en todas las sustancias, postula:

«Es suficiente admitir la existencia de corpúsculos individuales como el único tipo de sustancia que da origen a todos los cuerpos».

Ello no obsta para reconocerle a Boyle el mérito de haber preparado el camino para el concepto de *sustancias o cuerpos simples* (Lavoisier) al rechazar la existencia de los «elementos tradicionales», que no eran sino principios filosóficos metafísicos.

La mejor prueba de las reticencias de Boyle en relación con la adopción de su nuevo concepto de «elemento» puede hallarse en su propio escepticis-

mo, que le impidió pronunciarse en concreto ante la cuestión de decidir qué sustancias eran simples y cuáles eran compuestas. Tal hecho debe interpretarse, sin embargo, como una actitud de prudencia del experimentador científico por excelencia que fue Boyle ante la imposibilidad de poder poner de manifiesto experimentalmente las últimas implicaciones de su teoría corpuscular, lo cual no era factible de llevar a cabo con los medios experimentales de la época.

En definitiva, la metafísica corpuscular de Boyle era una cosa y su pragmatismo experimental era otra bien distinta. A través de su teoría corpuscular y la jerarquía que supuso para dichos corpúsculos («*minima naturalia*», «concreciones primarias, o cepas», compuestos, etc.) Boyle llegó a intuir algo que se aproximaba al actual concepto de la molécula química, pero carecía de cualquier noción próxima al concepto moderno del átomo.

Lo hasta aquí expuesto es suficiente para dar una idea clara de la compleja y paradójica personalidad científica de Boyle, cuya realidad en la historia de la Ciencia, en general, y de la Química en particular se malinterpreta con frecuencia dentro de un marco de crítica excesivamente simplista, que no considera debidamente el amplio espectro de facetas que presenta la extensa y desordenada actividad científica de Boyle, cuya realidad resulta tanto más difícil de comprender a través de sus «*apsódicos*» escritos, que suelen exhibir una gran mezcolanza de tópicos colocados desordenadamente, carente de una mínima unidad y solución de continuidad en muchos casos, cuya explicación puede hallarse tanto en su propia metodología frente a la publicación (esencialmente discontinua e improvisada), como en su frecuente recurso a emplear amanuenses para realizar dicho trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- W. OSTWALD, «*L'evolution d'une science: La Chimie*», Flammarion (París), 1909.
M. BOAS, «*Robert Boyle and seventeenth chemistry*», Cambridge University Press, 1958.
G. BUGGE, «*Das Buch der grossen Chemiker*», Verlag Chemie GmbH, Weinheim, 1974.
C. C. GILLESPIE (editor), «*Dictionary of scientific bibliography*», Scribner's & Sons, New York, 1981.
I. ASIMOV, «*Biographical encyclopedia of science and technology*», Doubleday & Sons, New York, 1981.
J. R. PARTINGTON, «*A short history of chemistry*», Dover Publ. Inc., New York, 1989.
C. SOLÍS, «*Robert Boyle: Física, química y filosofía mecánica*», Alianza Editorial (Madrid), 1985.

- A. L. LAVOISIER, «*Tratado elemental de química*», Alfaguara (Madrid), 1982.
- S. I. VALLOV, «*Isaac Newton*», Nauka (Moscú), 1989.
- B. T. DOBBS, «*The foundation of Newton's alchemy*», Cambridge University Press, Cambridge, 1975.
- W. EAMON, «New light on Robert Boyle and the discovery of colour indicators», *Ambix*, 27 (3) 204-9 (1980)
- C. MEINEL, «Early seventeenth-century atomism: Theory, epistemology, and the insufficiency of experiment», *Isis* 79, 68-103 (1988).
- YUNG SIK KIM, «Another look at Robert Boyle's acceptance of the mechanical philosophy: Its limitations and its chemical and social contexts», *Ambix* 38 (1) 1-10 (1991)
- R. STEVENSON, «The sceptical chymist», *Chem. Brit.*, Septiembre 1991, 767.
- C. WEBSTER, «Water as the ultimate principle of nature: The background to Boyle's sceptical chymist», *Ambix* XIII (2) 96-107 (1966).
- B. RICHARD, O. B. E. PILCHER, «Boyle's laboratory», *Ambix* II (1) 17-20 (1938)
- A. A. THDE, «Alchemy in reverse: Robert Boyle on the degradation of gold», *Chymia* 9, 47-57 (1964)
- A. G. DEBUS, «Solution analyses prior to Robert Boyle», *Chymia* 8, 41-60 (1962)
- D. REILLY, «Robert Boyle and his background», *J. Chem. Ed.*, Abril 1951, 178-83.
- A. J. THDE, «Antecedents to the Boyle concept of the elements», *J. Chem. Ed.* 33 (11) 548-51 (1956).
- R. G. NEVILLE, «The sceptical chymist, 1661», *J. Chem. Ed.*, 38 (3) 106-109 (1961).
- D. THORBURN BURNS, Robert Boyle (1627-1691): I. «A foundation stone of analytical chemistry in the British Isles»: *Life and thought Anal. Proc.*, mayo 1982, 224-233. II. «Literary style, specific contributions to the principles and practice of analytical science», *Anal. Proc.* junio 1982, 288-95. III. «American and dutch connections», *Anal. Proc.*, septiembre 1985, 253-56. IV. «Robert Boyle's determination of iron in Tunbridge water: The earliest colorimetric quantitative reaction?», *Anal. Proc.*, marzo 1986, 75-77. V. «Hungarian mines, minerals and mineral waters», *Anal. Proc.*, octubre 1986, 349-51. VI. «Contributions to the early study of luminiscence», *Anal. Proc.*, noviembre 1991, 362-65.
- M. T. MARTIN SANCHEZ, A. BELLIDO GALLEGO, «Robert Boyle (1627-1691)», *Quim. Ind.*, 37 (11) 852-54 (1991)
- D. THORBURN BURNS, «Highlights of the history of quantiation in chemistry», *Fresenius J. Anal. Chem.*, 337, 205-12 (1990).

Dirección del autor:

J. A. PÉREZ-BUSTAMANTE DE MONASTERIO
Catedrático de la Universidad de Cádiz
Apartado 40
11510 PUERTO REAL (Cádiz)