

# Química: ¿Quién eres, a dónde vas y cómo te alcanzamos?

Vicente Talanquer\*

**ABSTRACT (Chemistry: Who are you? Where are you going? How do we catch up with you?)**

This paper presents a personal reflection on the nature of Chemistry, its potential areas of development in the 21<sup>st</sup> century, and the corresponding implications for chemistry education.

Beyond reflecting about basic characteristics of Chemistry as a science and speculating on future research trends in this discipline, the central goal of this essay is to motivate chemistry teachers and instructors, as well as chemical educators, to question the relevance and validity of the current general chemistry curriculum at the different educational levels, and to promote the development of alternatives ways of conceptualizing such a curriculum.

**KEYWORDS:** chemistry, chemistry education, chemistry curriculum.

## Introducción

La reflexión sobre las áreas y temas de investigación que probablemente se convertirán en el centro de atención de los químicos en el siglo XXI tiene relevancia desde la perspectiva educativa por diversos motivos. Por un lado, nos permite analizar y evaluar el currículo de química actual con base en su relevancia e impacto potencial en la formación de individuos con la capacidad de participar en el desarrollo de la Química en el futuro o de comprender la naturaleza y el impacto social, económico y ambiental de tales desarrollos. Por otro, nos puede dar ideas sobre el tipo de conocimientos y habilidades que debemos desarrollar en nuestros estudiantes para que puedan participar de manera informada, crítica y activa en las sociedades del siglo XXI.

El desarrollo científico y tecnológico en los últimos 50 años ha sido tan acelerado que resulta difícil hacer predicciones sobre las áreas de investigación que se volverán dominantes en una disciplina dada. Sin embargo, uno puede especular sobre el futuro con base en el análisis de las áreas de investigación emergentes en el presente, y prestando atención a aquellos problemas que enfrenta la sociedad moderna sobre los que el desarrollo del conocimiento científico y tecnológico puede tener algún impacto (Ball, 1994, 1997; RSC, 2000; NRC, 2003). Es precisamente este tipo de análisis el que he utilizado en esta presentación para identificar las áreas de desarrollo potencial en Química que se describen más adelante. El objetivo de tales especulaciones va más allá de proporcionarles a los lectores una panorámica general de los avances en investigación química de los que quizás seremos testigos en este siglo. La intención central es utilizar este análisis para cuestionar la relevancia y validez del currículo tradicional en Química en los diversos niveles educativos, promover la dis-

cusión sobre el marco de referencia dominante en la enseñanza de la Química, y proponer formas alternativas de conceptualizar el currículo en esta disciplina.

Sin embargo, antes de hablar de la Química que posiblemente se practicará en el futuro o de la Química que, en consecuencia, sería deseable que se enseñara, resulta conveniente detenerse a reflexionar sobre la naturaleza de esta disciplina, sus intereses y motivaciones. Para hacerlo, me tomaré la libertad de describir y referirme a la Química como si se tratara de una persona, con sus virtudes y defectos, con sus alegrías y tribulaciones. El uso de analogías y metáforas en Química es ampliamente reconocido (Coll, 2006). El empleo de lenguaje antropomórfico para predecir o explicar el comportamiento de las sustancias químicas, o de los átomos y moléculas que las componen, es una característica esencial de la forma de hablar en la disciplina (Taber y Watts, 1996; Talanquer, 2007). Los elementos y compuestos, los átomos y las moléculas de los químicos desean, buscan, saltan, aman, se organizan y se atacan. Permítaseme entonces llevar este lenguaje al extremo, y darle cuerpo, mente y alma a la Química.



El Padre.

## Química: ¿Quién eres?

Es común que se diga que para conocer realmente a una persona, no hay nada mejor que conocer a su familia. Si éste es el caso, ¿quién y cómo es la familia de la Química? Desde mi perspectiva, la Química tiene padre y madre conocidos, y una serie de medias hermanas con las que a veces tiene una relación conflictiva.

## El Positivismo

El padre intelectual de la

\* Departamento de Química. Universidad de Arizona. Tucson, AZ 85721.

Correo electrónico: vicente@u.arizona.edu

Química moderna es, en gran medida, el “positivismo lógico”, quien la ha convencido de que el conocimiento científico válido se construye por medio de inferencias lógicas basadas en evidencia obtenida a través de la experimentación cuidadosa y sistemática, haciendo a un lado las especulaciones metafísicas. Esto implica rechazar las explicaciones basadas en la existencia de entidades o propiedades “trascendentes”, esto es, que están más allá de la esfera de los que puede percibirse o medirse en un laboratorio.

### La Alquimia

La Química idolatra a su padre porque le ha permitido crecer y madurar como una ciencia productiva, exitosa y respetable en los últimos 200 años. Este amor se sustenta en gran medida en el convencimiento de que la relación con el padre le ha ayudado a la Química a escapar de las garras de su madre, la Alquimia, un personaje que la hija consistentemente menosprecia y rechaza por considerarla anticuada, supersticiosa, oscura y obtusa. El odio o vergüenza por la madre es tal, que la Química frecuentemente se niega a reconocer lo mucho que ha heredado de ella, desde su implícita visión dualista, basada en la lucha



La Madre

de contrarios, sobre las propiedades de la materia y sus transformaciones (ácido contra base, oxidante contra reductor, nucleófilo contra electrófilo), hasta su inclinación irreprimible por las explicaciones basadas en conceptos con cierto carácter trascendente (sustancia, elemento, resonancia, aromaticidad, funcionalidad, orbital), así como su obsesión enfermiza con la simbología (Hoffmann, 1995; Paneth, 2003).

### La Física y la Biología

Para entender a la Química también resulta conveniente compararla con sus dos medias hermanas más conocidas. La mayor de ellas, la Física, es seria e imponente; la menor, la Biología, es hermosa y llena de vida. La hermana mayor es considerada la inteligente de la familia; la Física es racional, reflexiva, visionaria y se cuestiona constantemente sobre el origen de las cosas y sobre los principios fundamentales que



La Mayor: la Física

gobiernan al Universo. Sin embargo, como buena primogénita, es dominante, controladora e impositiva, y frecuentemente menosprecia a todos aquellos que no piensan como ella. Por su parte, la hermana menor, la Biología, es la bonita de la familia. Esta hermana es vital y multicolor, con múltiples intereses y preocupaciones. Lo mismo se pregunta por el origen de la vida que se interesa en la conservación de los recursos naturales de nuestro planeta. El desarrollo y maduración de la Biología en los últimos años ha sido impresionante, lo que la ha hecho un poco absorbente y presumida. La realidad es que, hoy día, todos buscan relacionarse con ella.



La Menor: la Biología

### La Química

La Química, por su parte, tiene la prototípica personalidad de la hermana “sándwich” o de la niña del medio. La inteligencia de la Física y la belleza de la Biología la han hecho medio insegura. Tiene la cabeza fragmentada con múltiples preocupaciones que, comparadas con las de sus hermanas, muchos consideran superficiales o mundanas: que si los alimentos que comemos, que si los productos de belleza, que si las drogas y las medicinas, que si las fibras para fabricar telas y vestidos, que si los fertilizantes y plaguicidas, que si la contaminación atmosférica, que si los combustibles alternativos. Su manera de ver el mundo oscila entre la rigurosidad y sistematicidad del padre, y el esoterismo y hermetismo de la madre. Sus ideas y acciones se debaten constantemente entre su poder innato para facilitarnos la vida y su capacidad innegable para destruirnos la existencia.

A pesar de sus defectos, la Química es quizá, de todas sus hermanas, la más pragmática, polifacética y creativa. Su capacidad transformadora se ha incrementado vertiginosamente en los últimos 150 años, y, hoy por hoy, se le considera la ciencia más productiva (Schummer, 1997a). Su forma de ver el mundo, si bien no tan rigurosa y fundamental como la de la Física o tan flexible y abierta como la de la Biología, le ha permitido desarrollar múltiples métodos y estrategias para analizar, sintetizar, transformar y modelar innumerables sustancias y materiales con múl-



La Química

tiples aplicaciones prácticas. Su pragmatismo extremo dota de riquezas a la mayoría de las personas que se asocian con ella. Los intereses centrales de la Química son tan extensos y variados que resulta difícil describir sus alcances de manera unificada. En cierta medida uno podría pensar que la Química representa un caso típico de personalidad múltiple o dividida, con cuatro alter egos dominantes: *La Psicóloga, la Artista, la Revolucionaria y la Soñadora*. En la siguiente sección se analiza lo que la vida parece depararle a cada una de estas personalidades.

### Química: ¿A dónde vas?

Resulta imposible resumir en unas cuantas páginas el futuro de la investigación básica y aplicada relacionada con la Química. En los últimos años la disciplina se ha extendido en múltiples direcciones y relacionado con una gran variedad de ramas de las ciencias y las ingenierías. Hoy día se habla, entre otras áreas, de química de alimentos, química de materiales, química ambiental, química forense, bioquímica, química farmacéutica, ingeniería química, astroquímica, geoquímica. Cada día, la ciencia de las moléculas se vuelve más interdisciplinaria y se hace presente en casi cada faceta del quehacer científico y tecnológico moderno (Ball, 1994, 1997; RSC, 2000; NRC, 2003). No por nada la Química se identifica como la ciencia central. Intentar entonces especular sobre lo que sucederá en cada una de estas áreas se convierte en una tarea monumental. Sin embargo, si en lugar de concentrarnos en el posible progreso del “conocimiento químico” dirigimos la atención a los avances potenciales del “pensamiento” químico moderno, entonces, quizá, tengamos mayor éxito. Déjenme explicarlo.

Las áreas de aplicación de la Química son tan variadas, que es común que los químicos piensen en su disciplina de manera temática y fragmentada. Basta abrir un libro de química general y leer el título de sus capítulos para entender a lo que me refiero: Estructura Atómica, Enlace Químico, Termodinámica, Cinética Química, Electroquímica, Química Descriptiva. Aun en textos recientes que buscan resaltar la relevancia de la Química en la sociedad moderna, la fragmentación es manifiesta: Polímeros, Catálisis, Alimentos, Drogas y Medicamentos, Fuentes Energéticas. Pareciera como si no existieran ejes integradores del trabajo y las formas de pensar en Química. Es por ello que cuando me encuentro libros o artículos que le dan coherencia a la disciplina, el corazón me salta de alegría.

Tal es el caso del libro *Beyond the Molecular Frontier (Más Allá de la Frontera Molecular)* publicado recientemente por el National Research Council (Consejo Nacional de Investigación) en Estados Unidos (NRC, 2003). En este texto se resume la visión de destacados investigadores y profesionales de la Química y la Ingeniería Química sobre el futuro de su disciplina. La organización del libro sugiere que la investigación, el trabajo y el pensamiento químico, independientemente del área de aplicación, está guiada por cuatro preguntas esenciales sobre las propiedades de las sustancias, las cuales definen cuatro áreas de interés centrales: *¿Qué es esto?* (Análisis), *¿Cómo lo hago?* (Síntesis), *¿Cómo lo cambió?* (Transforma-

ción), y *¿Cómo lo explico o predigo?* (Modelaje). Así de simple; sólo cuatro preguntas, cuatro intenciones, cuatro personalidades que analizar para crear un bosquejo de tan vasta y compleja disciplina.

### Del Análisis o “La Psicóloga”

Si uno lo medita bien, la Química se hace preguntas sobre las sustancias de su interés que son, en esencia, muy similares a las que un psicólogo se hace de sus pacientes. Y tú, ¿quién eres realmente? ¿Qué te hace similar o diferente a otras? ¿Qué define tu identidad? Como los psicólogos, los químicos son descubridores de identidades y reveladores de personalidades. Una de las metas centrales de la Química es descubrir la identidad y propiedades de las sustancias, y con ello reducir la complejidad generada por la diversidad de materiales en nuestro mundo (Hoffmann, 1995). Para hacerlo, los químicos han desarrollado una gran variedad de instrumentos y técnica analíticas para separar, detectar, identificar y cuantificar las diferentes sustancias presentes en un sistema. Estas herramientas están basadas en una premisa básica, toda sustancia posee una característica o propiedad diferenciadora que puede detectarse o medirse y que la distingue de otras sustancias. Ya sea a través del análisis del tipo de luz que absorbe o emite, o de la manera en la que interacciona con otros materiales, la creencia central es que la identidad de cualquier sustancia puede ser desvelada.

Dada la estrecha relación entre las propiedades de una sustancia y su estructura molecular, muchas de las técnicas analíticas modernas han sido desarrolladas para proporcionar claves sobre composición atómica y geometría molecular. Entre ellas encontramos variedad de técnicas espectroscópicas basadas en el análisis de los diferentes tipos de radiación electromagnética emitida, absorbida o reflejada por las sustancias. El desarrollo de diferentes espectroscopías como méto-

dos de análisis químico es quizás uno de los hechos más relevantes de la Química del siglo XX y promete seguir siéndolo en el siglo XXI (RSC, 2000). Hoy día, este tipo de métodos de análisis nos permiten monitorear, minuto a minuto, desde la presencia de contaminantes en la atmósfera hasta la transformación metabólica de innumerables sustancias en nuestro cuerpo. Por ejemplo, gracias a la presencia de espectroscopios de emisión y absorción de radiación ultravioleta, visible, infrarroja y de microondas a bordo del satélite Aura en órbita alrededor de la Tierra (Allen, 2005), la NASA tiene la capacidad de observar y analizar la evolución temporal de más de 20 sustancias de vital importancia en nuestra atmósfera, tales



La Psicóloga.

como ozono (O<sub>3</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), monóxido de carbono (CO), y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Por otro lado, técnicas analíticas basadas en principios similares nos permiten estudiar desde cómo funciona el cerebro hasta descubrir la estructura molecular de las proteínas que catalizan múltiples procesos en nuestro cuerpo (NRC, 2006).

Uno puede esperar que el desarrollo de nuevos métodos de análisis químico, así como la mejora de los ya existentes, sea una de las metas centrales de la Química en el presente siglo. Particularmente se buscará mejorar la precisión, sensibilidad, especificidad y resolución espacial de las técnicas analíticas existentes con el fin de poder estudiar sistemas cada vez más pequeños y complejos (e.g., proteínas, nano-estructuras), utilizando volúmenes mínimos de muestra a muy bajas concentraciones de las sustancias de interés. Éste es el tipo de herramientas que se requieren para estudiar sistemas biológicos, pero que también son de gran utilidad para investigar sistemas muy lejanos (e.g. estrellas y planetas). La sistematización de estas técnicas, y la reducción de sus costos, será también de importancia prioritaria si se desea hacerlas parte integral de los procesos de producción a gran escala de nuevos nano- y bio-materiales.

### De la Síntesis o “La Artista”

La Química se distingue de otras ciencias por su habilidad para “crear” sus propios objetos de estudio (Hoffman, 1995). Los químicos “artistas”, aquellos dedicados a la síntesis química, son tan creativos que sintetizan del orden de dos millones de nuevas sustancias, esto es, sustancias que no existían antes en el planeta, cada año o del orden de ¡cuatro sustancias nuevas por minuto! (Schummer, 1997a). Es verdad que muchas de estas sustancias no tienen aplicaciones prácticas y muchas de ellas son sintetizadas con el solo fin de aprender más sobre métodos para crear sustancias (Schummer, 1997b). Sin embargo, basta con imaginar que una pequeña fracción de ellas pueda ser utilizada para fabricar nuevos medicamentos, fertilizantes, plaguicidas, telas, plásticos u otros materiales, para tener una idea del impacto que esta faceta de la Química tendrá en nuestras vidas.

De entre las múltiples síntesis químicas que dieron lugar a productos materiales que transformaron las sociedades del siglo XX, la síntesis de polímeros artificiales como el nailon, el poliéster y el polietileno, de medicinas como la sulfanilamida y el *cis*-platino, y de materiales opto-electrónicos, como los semiconductores, son particularmente relevantes (Ball, 1994, 1997; RSC, 2000; NRC, 2003). Por un lado, el desarrollo de fibras y plásticos diversificó de forma extraordinaria el tipo de materiales disponibles para fabricar desde casas y automóviles, hasta envases y prótesis corporales. Por otro, la producción de medicinas ha ayudado a incrementar la esperanza de vida de los seres humanos en más del 50% en los últimos 100 años. Por su parte, la revolución informática de la que hemos sido testigos en los últimos 50 años descansa en la síntesis de sustancias con novedosas propiedades electrónicas y opto-electrónicas.



La Artista.

Es probable que las síntesis de nuevos materiales poliméricos y opto-electrónicos, así como de sustancias medicinales también jueguen un papel central en la Química del siglo XXI. Será importante desarrollar métodos versátiles y confiables que permitan incrementar la ligereza, resistencia, durabilidad y reciclabilidad de las fibras y plásticos que se produzcan. Se buscará diversificar el tipo de sustancias con interesantes propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas que puedan ser utilizados en la fabricación de dispositivos electrónicos y opto-electrónicos. Asimismo, se seguirá intentando sintetizar agentes antivirales y antibióticos para atacar virus y bacterias resistentes a las medicinas con las que hoy contamos, así como generar medicamentos que nos permitan curar, e incluso prevenir, el desarrollo de enfermedades tales como el cáncer, el mal de Alzheimer y la diabetes. En general, uno puede esperar que se invierta un esfuerzo considerable en la creación de sustancias y materiales “inteligentes”. Esto es, con la capacidad de auto-organizarse de manera espontánea en súper-estructuras compuestas por cientos o miles de moléculas unidades por fuerzas intermoleculares (como membranas, vesículas o superficies auto-ensambladas), o cuyas propiedades puedan modificarse de manera controlada usando estímulos externos (variando la temperatura, presión, humedad o el pH, o aplicando campos eléctricos o magnéticos).

### De la Transformación o “La Revolucionaria”

Una de las metas centrales de la Química es puramente revolucionaria: la inducción, control y manipulación de los procesos físicos y químicos de transformación de la materia. Tales transformaciones tradicionalmente implican cambios en la composición, estado, estructura u organización de los componentes materiales de un sistema. El interés se centra en el desarrollo de métodos y estrategias para seguir paso a paso tales transformaciones, controlar su direccionalidad y el tiempo que tardan en llevarse a cabo, así como manipular los posibles resultados del proceso.

Los avances de la Química en el área de transformación de la materia en los últimos 150 años han sido extraordinarios. Hoy día contamos con técnicas y estrategias que nos permiten estudiar cambios físicos y químicos en diversas escalas espaciales y temporales (RSC, 2000; NRC, 2003). Uno de los mayores retos de la Química es que los procesos de su interés ocurren en escalas de tiempo que van desde los femtosegundos (10<sup>-15</sup> s; tiempo asociado a una vibración molecular o a la ruptura de un enlace químico) hasta varios meses o años. Adicionalmente, estos procesos se dan en escalas espaciales que



La Revolucionaria.

se extienden desde los varios picómetros ( $10^{-12}$  m; radios atómicos) hasta los cientos de metros en plantas industriales. En un mismo sistema químico, múltiples cambios pueden ocurrir en diferentes escalas espaciales y temporales, lo que requerirá diversas herramientas experimentales para estudiarlos y manipularlos. Por ejemplo, en el interior de una célula, cambios en la conformación de proteínas ocurren en el orden de segundos, mientras que la adsorción de los iones que regulan algunos de estos cambios estructurales se da en tiempos mil veces más cortos.

Parte del trabajo futuro en esta área seguramente se concentrará en el perfeccionamiento de las herramientas desarrolladas para estudiar mecanismos de reacción, particularmente en sistemas biológicos o bajo condiciones extremas de presión y temperatura. La comprensión de los sistemas biológicos a nivel molecular no sólo nos permitirá diseñar medicinas más eficaces y especializadas, sino también facilitará el diseño de materiales “inteligentes” con la capacidad de adaptarse a las condiciones del medio en que se incorporan. De particular importancia resulta el estudio y entendimiento de las propiedades y acción catalítica de las enzimas que regulan los procesos químicos en sistemas biológicos. La incorporación de enzimas, naturales, modificadas, o sintéticas, como agentes catalíticos en procesos químicos en el laboratorio se espera incrementar considerablemente la capacidad para controlar la estructura molecular de los productos de reacción. La observación y el control a nivel atómico y molecular de las reacciones químicas es uno de los sueños más persistentes de la Química. El perfeccionamiento y desarrollo de técnicas experimentales ultrarrápidas basadas en el uso de láseres de femtosegundos promete hacerlo una realidad (RSC, 2000; NRC, 2003).

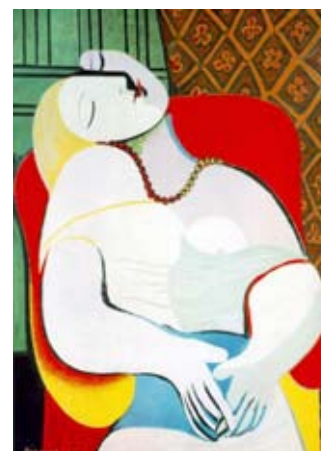
### Del Modelaje o “La Soñadora”

La Química es, en muchos sentidos, una ciencia que parece estar definida y tomar forma a través de la lucha de contrarios (Hoffmann, 1995). Por un lado, los químicos crean constantemente nuevas sustancias, mientras por el otro las destruyen con el fin de analizarlas. Los productos de la química tienen la potencialidad de mejorar la calidad de vida de todos los habitantes del planeta, pero también pueden convertirla en un verdadero infierno. Los químicos se enorgullecen de su ciencia por su eminente carácter experimental, lo que la hace tener los pies bien puestos sobre la tierra, pero la disciplina es también una de las ciencias más abstractas, pues las explicaciones y predicciones de los químicos se basan en la manipulación mental de entidades inaprensibles, como átomos y mo-

léculas, que la convierten en una soñadora con la cabeza frecuentemente en las nubes.

Los sueños electrónicos, atómicos y moleculares de la Química tienen una meta bien definida: explicar y predecir tanto las propiedades de sustancias nuevas y conocidas, como las características de los procesos de transformación en los que participan. La generación de modelos submicroscópicos sobre la estructura de la materia y sus transformaciones ha sido crucial en el desarrollo de la disciplina, y le ha dado la capacidad para transformar sueños en realidades. Día tras día, los químicos usan estos modelos para diseñar nuevas sustancias, predecir y controlar los productos de una reacción química, o para dar sentido a los problemas con los que se enfrentan. Esta capacidad predictiva y explicativa se ha multiplicado enormemente con el desarrollo de sistemas y métodos computacionales que aceleran los cálculos matemáticos involucrados y facilitan la visualización de los resultados (NRC, 2003, 2006). Esta tecnología hoy día permite construir animaciones y simulaciones de sistemas y procesos diversos, desde cambios conformacionales en las proteínas de nuestro cuerpo hasta la evolución de contaminantes en la atmósfera.

Uno de los retos centrales en esta área es el desarrollo de métodos computacionales que permitan explorar sistemas y fenómenos a varias escalas. Como ya lo mencionamos, el estudio de la estructura y evolución de un sistema químico involucra escalas espaciales y temporales muy diversas, lo que dificulta su modelación y simulación. Idealmente sería deseable contar con estrategias teóricas y computacionales que permitan hacer predicciones rápidas, eficientes y precisas sobre las propiedades de una sustancia dada su estructura electrónica, atómica y molecular, así como diseñar moléculas que den lugar a sustancias con propiedades físicas y químicas preestablecidas.



La Soñadora.

### Química: ¿Cómo te alcanzamos?

Dados los saberes, quehaceres y pensares de la Química del presente y el futuro, uno puede preguntarse ¿qué debemos enseñarle a nuestros estudiantes sobre esta disciplina? ¿En qué medida el actual currículo de química general en los niveles medio, medio-superior y superior les proporciona a los estudiantes las herramientas intelectuales necesarias para dar sentido, analizar y reflexionar sobre los productos de la Química y su impacto en nuestro mundo? Mi opinión es que los currículos de química que hoy día son dominantes se basan en una concepción anticuada de la disciplina, que pone demasiado énfasis en el aprendizaje de lo que los químicos “sa-

ben”, o en las aplicaciones prácticas de dicho conocimiento, haciendo a un lado el análisis, la discusión, y la reflexión sobre cómo los químicos piensan y sobre el enorme poder predictivo, explicativo y transformador de su forma de ver el mundo. De nuevo, déjeme tratar de explicarlo.

Si uno quisiera generar una metáfora para describir el currículo de química dominante, la idea de una “escalera temática” me parece bastante adecuada (Schwartz, 2006). La filosofía central de este currículo es la de proporcionar a los estudiantes herramientas básicas de manera escalonada para entender los modelos y principios químicos sobre estructura y transformación de la materia. Primero deben reconocer las propiedades básicas de la materia; luego deben aprender que hay átomos y moléculas; en seguida es importante que reconozcan diferentes tipos de reacciones químicas; el siguiente escalón consiste en aprender que la masa se conserva y aplicar esta idea para balancear reacciones y hacer cálculos estequiométricos; los siguientes pasos los sumergen en estructura atómica, enlace químico, etc., etc. (Padilla, 2006). Desde mi perspectiva, se trata de un currículo dominado por la faceta explicativa de la personalidad de “La Soñadora”. Sin importar el orden en que se decida poner los escalones, el objetivo es que los alumnos aprendan cómo es que los modelos químicos permiten explicar las propiedades y transformaciones de la sustancias. Nos se trata de analizar, discutir y reflexionar cómo y para qué se construyen estos modelos, sino sólo de aprender a usarlos.

Las limitaciones de este currículo han sido señaladas por variedad de autores (Gillespie, 1991; Chamizo, 2001). En general, el número de temas que se introduce es muy grande, lo que promueve su cobertura superficial en detrimento del aprendizaje significativo. La organización temática proporciona una visión fragmentada del conocimiento químico. Algunos de los temas incluidos, así como muchos de los ejemplos utilizados para ilustrar ideas, tuvieron importancia en el desarrollo del conocimiento químico hace más de 100 años, pero su relevancia para la química moderna es tangencial o mínima. En general, el currículo pone mayor énfasis en el desarrollo de habilidades algorítmicas para resolver preguntas y problemas (e.g., cálculos estequiométricos, construcción de estructuras) que en el análisis y reflexión sobre las ideas y conceptos centrales. Es un currículo en el que todas las personalidades de la Química están desdibujadas.

En los últimos años se han propuesto currículos de química alternativos, entre los que destacan los influenciados por la corriente Ciencia-Tecnología-Sociedad, tales como QuimCom, el proyecto Salters y Química en Contexto (Garriz, 1994; Membiela, 1997). Estos currículos tienen una estructura que puede concebirse como una “telaraña temática” (Schwartz *et al.*, 1994). En contraste con la organización vertical del currículo dominante, en estos casos se utiliza una estructura horizontal para presentar una serie de temas relevantes para la sociedad moderna (Calentamiento Global, Adelgazamiento de la Capa de Ozono, Fuentes de Energía, etc.). La secuencia de temas no sigue una secuencia escalonada

o jerárquica y cada uno de ellos se utiliza como base para construir la “telaraña” de ideas, conceptos y modelos químicos que son necesarios para comprender la problemática discutida.

Sin dejar de reconocer el avance que este tipo de abordaje representa en la reconceptualización de la enseñanza de la Química en los niveles introductorios, este tipo de currículo adolece de problemas similares a los del currículo dominante. En general, la cantidad de información incluida en los temarios es excesiva y predominantemente descriptiva. El énfasis, de nuevo, se centra en el aprendizaje de los conocimientos químicos que, en este caso, tenemos sobre sistemas de interés y relevancia individual y social, relegando a segundo plano el análisis, discusión y manipulación de las herramientas intelectuales y experimentales que nos permiten generar tal conocimiento. Sin duda se trata de conocimiento relevante, pero el énfasis se pone en los saberes, no en los quehaceres y pensares. Adicionalmente, la estructura del currículo dificulta la integración de las ideas y conceptos químicos centrales pues estos tienden a introducirse de manera fragmentada.

Es claro que toda propuesta curricular tendrá pros y contras. De hecho, dudo que exista el currículo ideal de química general. Sin embargo, considero que los educadores en química debían invertir más tiempo generando, explorando y evaluando diversas alternativas curriculares que respondan de mejor manera a las necesidades de los estudiantes y de las sociedades en las que viven. El currículo de química general actual es demasiado monolítico. Es en este espíritu que quisiera formular una propuesta. ¿Qué tal si en lugar de organizar el currículo de química alrededor de temas, lo organizamos alrededor de preguntas esenciales en la disciplina? ¿Qué tal si en lugar de introducir conceptos e ideas centrales de manera segmentada, tratamos de construir progresiones de aprendizaje para cada uno de ellos? ¿Qué tal si en lugar de utilizar ejemplos y problemas con valor académico o histórico, nos basamos en cuestiones relevantes para las sociedades de hoy? ¿Qué pasaría si en lugar de enfatizar el aprendizaje del conocimiento químico que poseemos, nos enfocamos al análisis, la discusión y la práctica de las formas de pensar que han hecho de la Química una ciencia tan poderosa y productiva?

Desde mi perspectiva, el objetivo central de un curso introductorio de química para los estudiantes del siglo XXI debía ser el que los alumnos reconocieran que el pensamiento químico moderno es de gran utilidad para dar respuesta a preguntas fundamentales sobre las sustancias y los procesos en nuestro mundo. En general, habría que enfatizar que existen cuatro preguntas esenciales a las que la Química busca dar respuesta y que dichas preguntas definen cuatro propósitos fundamentales: *¿Qué es esto?* (Análisis), *¿Cómo lo hago?* (Síntesis), *¿Cómo lo cambió?* (Transformación), y *¿Cómo lo explico o predigo?* (Modelaje). Los estudiantes deben apreciar que las respuestas a estas preguntas son de importancia central en nuestras vidas, particularmente en cuatro áreas fundamentales: Medio Ambiente, Vida y Salud, Fuentes de Energía y Diseño de Materiales; es de esperar que los problemas e

investigaciones en estas áreas dominen las discusiones científicas, políticas y sociales en este siglo.

Por qué no imaginar entonces un currículo organizado y guiado por preguntas como éstas:

- ¿Cómo distinguimos a las sustancias que nos rodean?
- ¿Cómo determinamos su estructura?
- ¿Cómo predecimos sus propiedades?
- ¿Cómo las sintetizamos?
- ¿Cómo analizamos los cambios químicos?
- ¿Cómo predecimos dichos cambios?
- ¿Cómo los controlamos?
- ¿Cómo aprovechamos la energía que generan?

La discusión, análisis, reflexión y uso de las herramientas intelectuales y prácticas desarrolladas por los químicos para dar respuesta a este tipo de preguntas, aplicadas a sistemas de interés individual o social, debían ser los ejes conductores del trabajo en las aulas de Química. ¿Cómo sabemos que la capa de ozono se ha adelgazado? ¿Cómo detectamos la presencia de contaminantes en el ambiente? ¿Cómo diseñamos antibióticos? ¿Cómo controlamos la corrosión de estructuras metálicas en las grandes ciudades? ¿Cómo investigamos qué procesos químicos dieron lugar al origen de la vida en el planeta? La meta debía ser que los estudiantes entendieran, practicaran y apreciaran las formas de pensar y las técnicas desarrolladas por los químicos para dar respuesta a preguntas como éstas, entendiendo que el objetivo central es aprender a generar respuestas independientemente de los detalles específicos del sistema que se investiga.

Me queda claro que la mayoría de los docentes de química consideran que hay conceptos e ideas fundamentales que los estudiantes deben aprender. No sé cuántas veces he escuchado frases como “los estudiantes necesitan aprender nomenclatura porque es el lenguaje de la Química”, “el mol es un concepto central que hay que estudiar pues en él se sustenta la Química cuantitativa”, “es imperativo que los estudiantes entiendan el concepto de sustancia química”, “es fundamental que los estudiantes sepan cómo aplicar las leyes de los gases”. Sin embargo, cuando reflexiono sobre los intereses, aplicaciones y avances de la Química moderna y los comparo con los conceptos e ideas que hoy día presentamos en el salón de clases, no puedo dejar de reconocer la enorme distancia que los separa. Al entrar en una clase tradicional de química hoy día, siento como si me transportaran en el tiempo a una aula a comienzos de siglo XIX en la que las discusiones sobre las leyes de los gases o las leyes ponderales eran de central relevancia. Pero en el siglo XXI me parece que hay otras ideas más fundamentales que discutir; ideas más útiles, más relevantes, más apropiadas, y muchos más poderosas en su capacidad para desarrollar la capacidad intelectual y la conciencia crítica de los estudiantes de este milenio. Sobre todo, me parece que hay muy poca reflexión sobre el enorme poder analítico, creativo, transformador e imaginativo del pensamiento químico moderno, lo que, como educadores de la Química, debería resultarnos inaceptable.

## Bibliografía

- Allen, J., How Earth got is AURA, *ChemMatters*, September, 4-7, 2005.
- Ball, P., *Designing the molecular world*, Princeton University Press, Princeton, USA, 1994.
- Ball, P., *Made to measure: New materials for the 21st century*, Princeton University Press, Princeton, USA, 1997.
- Chamizo J.A., El currículo oculto en la enseñanza de la química, *Educ. quím.*, **12**, 194-198, 2001.
- Coll, R.K., The role of models, mental models and analogies in chemistry teaching. En: Aubusson, P.J., Harrison, A.G., y Ritchie, S.M. (eds.), *Metaphor and analogy in science education*, Science and Technology Education Library, Springer, Netherlands, 2006, pp. 65-77.
- Garritz, A., Ciencia-Tecnología-Sociedad. A diez años de iniciada la corriente, *Educ. quím.*, **5**(4), 217-223, 1994.
- Gillespie, R.J., What is wrong with the general chemistry course?, *J. Chem. Educ.*, **68**, 192-194, 1991.
- Hoffmann, R., Lo mismo y no lo mismo, Fondo de Cultura Económica, México D.F., México, 1995.
- Membiola Iglesia, P., Una revisión del movimiento educativo Ciencia-Tecnología-Sociedad, *Enseñanza de las Ciencias*, **15**(1), 51-57, 1997.
- National Research Council (NRC), *Beyond the molecular frontier: Challenges for chemistry and chemical engineering*, The National Academy Press, Washington, DC, USA, 2003.
- National Research Council (NRC), *Visualizing Chemistry: The progress and promise of advanced chemical imaging*, The National Academy Press, Washington, DC, USA, 2006.
- Padilla, K., El contenido del libro de química para el bachillerato, *Educ. quím.*, **17**(1), 1-13, 2006.
- Paneth, F.A., The epistemological status of the chemical concept of element, *Foundations of Chemistry*, **5**, 113-145, 2003.
- Royal Society of Chemistry (RSC), *Cutting edge chemistry*, Royal Academy of Chemistry, London, GB, 2000.
- Schummer, J., Scientometric studies on chemistry I: The exponential growth of chemical substances, 1800-1995, *Scientometrics*, **39**(1), 107-123, 1997a.
- Schummer, J., Scientometric studies on chemistry II: Aims and methods of producing new chemical substances, *Scientometrics*, **39**(1), 125-140, 1997b.
- Schwartz, A.T., Bunce, D.M., Silberman, R.G., Stanitski, C.L., Stratton, W.J., y Zipp, A.P., Chemistry in context: Weaving the web, *J. Chem. Educ.*, **71**, 1041-1044, 1994.
- Schwartz, A.T., Contextualized chemistry education: The American experience, *International Journal of Science Education*, **28**, 977-998, 2006.
- Taber, K.S. y Watts, M., The secret life of the chemical bond: Students' anthropomorphic and animistic references to bonding, *International Journal of Science Education*, **18**(5), 557-568, 1996.
- Talanquer, V., Explanations and teleology in chemistry education, *International Journal of Science Education*, **29**(7), 853-870, 2007.