

# La enseñanza de la química para la sociedad del siglo XXI, caracterizada por la incertidumbre\*

Andoni Garritz<sup>1</sup>

## ABSTRACT (Chemistry teaching for 21st century society, characterized by uncertainty)

Society, science and technology are modernizing with brisk changes, and for that reason we feel that education must be renewed. We start this essay by analyzing the years of finalizing 19th century and beginning of the 20th, comparing all of that revolutionary changes with today's. Related with that, it is true that science has adopted an uncertainty sign since the arrival of the Heisenberg's Principle and chaotic systems.

We wonder how our students can face all of these changes and all uncertainty in their science courses. We focus on ten topics that will constitute a Decalogue of Paradigms for the future of Chemistry Education: 1) Chemistry at the frontier; 2) Analogies; 3) Uncertainty; 4) Inquiry; 5) Models and modeling; 6) Nature of science; 7) Competencies; 8) Risk; 9) Communication and Information Technologies, and 10) Affectivity.

**KEYWORDS:** Chemistry teaching, paradigms of education; uncertainty; brisk changes

## Introducción. Cambios rápidos ayer y hoy

Siempre que razonamos que la sociedad, su ciencia y su tecnología están cambiando muy rápidamente hablamos de la necesidad de modernizar la educación.

Hace poco más de un siglo, nos dice Richard Buckminster Fuller (Snyder, 1980), inventor del domo geodésico (en honor a quien posteriormente se dio el nombre de fullerenos a las especies químicas compuestas por átomos de carbono, tipo bola de fútbol):

Nací en un año extraordinario, 1895, el mismo en que se inventaron los rayos X y lo invisible se hizo visible. Cuando tenía dos años se descubrió el electrón. A los siete, el primer automóvil circuló por las calles de Boston, y a los ocho, los hermanos Wright volaron por el cielo. Lo imposible ocurría cada día, acelerábamos a una velocidad tremenda.

Habría que añadir al relato de Buckminster Fuller que nace el mismo año en que muere Louis Pasteur y que al año de su

nacimiento Henri Becquerel descubre la radiactividad; a sus cinco Max Planck propuso la cuantización, que rompió con los moldes de la energía en la física clásica; que a sus diez, Albert Einstein introdujo la teoría especial de la relatividad y a sus doce reinterpretaba con la física cuántica las anómalas capacidades caloríficas de los elementos sólidos.

En el área de la fisicoquímica también se daban grandes cambios, como lo manifiesta la entrega de los premios Nobel en sus primeros nueve años a tres científicos notables de esta área, como Jacobus Hendricus van't Hoff (en 1901), Svante Arrhenius (en 1903) y Wilhelm Ostwald (en 1909), el primero y el último co-editores de la primera revista sobre fisicoquímica: *Zeitschrift für Physikalische Chemie* desde su nacimiento en 1887 —posteriormente fue Ostwald su editor único hasta 1922. Por esos tiempos (en 1902) Josiah Williard Gibbs, otro notable fisicoquímico estadounidense, publicó su libro sobre *Principios elementales de la Mecánica Estadística*, aunque moriría al año siguiente. En ese mismo año Ludwig Boltzmann había vuelto a Viena y dictaba conferencias sobre filosofía natural, después de los fuertes debates con Mach sobre la existencia de los átomos (Lindley, 2001). En 1906, cuando el inventor tenía once años, Walther H. Nernst planteó la tercera ley de la termodinámica en los siguientes términos (Wilks, 1961): "El cambio de entropía en una reacción química tiende a disiparse conforme la temperatura se aproxima al cero absoluto". Fue en 1909, a los 14 años de Buckminster, cuando Jean Baptiste Perrin escribe el artículo "Mouvement brownien et réalité moléculaire" en los *Annales de Chimie et de Physique* que dio las bases experimentales para que en la conferencia Solvay de 1911 se llegara masivamente a la conclusión positiva acerca de la estructura corpuscular de la materia (ver a Nernst y a Perrin en la ilustración 1). Más de cien años tardó en convencer a los científicos

\* Texto de la conferencia plenaria inaugural en el XLIV Congreso Mexicano de Química, dictada el 26 de septiembre de 2009 en Puebla de los Ángeles, México. Se ha complementado la información que dio en la conferencia para dar un mejor marco a este texto. El autor desea aclarar que varias frases y citas de este trabajo coinciden con el que presentó a la revista *Enseñanza de las Ciencias* como memoria de su conferencia plenaria en el VIII Congreso Internacional de Investigación en Didáctica de las Ciencias, en Barcelona, el 7 de septiembre de 2009 (Garritz, en prensa).

<sup>1</sup> Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México; 04510, México, D.F.

Correo electrónico: andoni@unam.mx



**Ilustración 1.** Primera conferencia Solvay, desarrollada en Bruselas en 1911. Sentados, de izquierda a derecha: Walter Nernst, Marcel Brillouin, Ernest Solvay (el industrial anfitrión), Hendrik Lorentz, Emil Warburg, Jean Baptiste Perrin, Wilhelm Wein, Marie Curie y Henri Poincaré. De pie: Robert Goldschmidt, Max Planck, Heinrich Rubens, Arnold Sommerfeld, Ferdinand von Lindemann, Maurice de Broglie (hermano de Louis), Martin Hans Christian Knudsen, Friedrich Hasenöhrl, George Hostelet, Edouard Herzen, James Jeans, Ernest Rutherford, Heike Kamerlingh Onnes, Albert Einstein y Paul Langevin.

la teoría atómica de Dalton —¿Cómo se nos ocurre pedirle a un alumno que lo asimile rápidamente!

Por otra parte, Moissan planea, diseña y construye el primer horno eléctrico (en 1892) y a los dos años del diseñador del domo geodésico (1897) alcanza, después de numerosas innovaciones, temperaturas alrededor de 3700°C (Wisniak, 2002, p. 272). Desde 1892 hasta la obtención del premio Nobel (en 1906) publica más de cien trabajos con los que se inicia la “Química de las Altas Temperaturas”. La química biológica da pasos agigantados con Eduard Büchner y su premio Nobel de 1907 (Bascañán Blaset, 2006). Este científico empezó su trabajo sobre fermentaciones en 1885, con su primer estudio: *Der Einfluss des Sauerstoffs auf Gärungen* (La influencia del oxígeno en las fermentaciones), nada menos que diez años antes del nacimiento de Buckminster Fuller.

A pesar de todos estos claros ejemplos de movilidad vigorosa de la física y la química entre 1895 y 1909, no le piden nada a los drásticos cambios actuales, cuando de quince años para acá se ha dado una multitud de descubrimientos:

- En 1995 les otorgan el Premio Nobel de Química a Mario Molina, Sherwood Rowland y Paul Crutzen por su trabajo de química de la atmósfera que condujo a explicar la reducción de ozono estratosférico en la primavera de la Antártida (el famoso hoyo de ozono);
- En 1996 se lo dan a Curl, Kroto y Smaley por el descubrimiento de los fullerenos;
- En 1999 a Ahmed Zewail por sus estudios de los complejos activados en las reacciones químicas mediante espectroscopía de femtosegundos;

- En 2000 son premiados los polímeros conductores obtenidos por Heeger, MacDiarmid y Shirakawa;
- En 2001, Knowles, Noyori y Sharpless lo obtienen por sus trabajos con catalizadores quirales y por sus avances en el estudio de la catálisis, Ertl en 2007;
- Por sus estudios sobre la reacción de metátesis en la química orgánica, alcanzan el Nobel en 2005 Chauvin, Grubbs y Schrock;
- La química biológica está de moda en este nuevo siglo, con toda la complejidad de la obtención de estructuras detalladas de las reacciones bioquímicas en los ribosomas (Ramakrishnan, Steitz y Yonath, 2009), o de la polimerasa de RNA (Kornberg, 2006), o por sus trabajos sobre la ubiquitina (Ciechanover, Hershko y Rose, 2004), o por el descubrimiento de canales por los que pasan los iones en las membranas celulares (Agre y MaKinnon, 2003) o por los métodos de identificación y análisis de macromoléculas biológicas (Fenn, Tanaka y Wüthrich, 2002).

Pero ¿por qué hablamos también de “percepción de incertidumbre”? Por ejemplo, en química analítica la incertidumbre es, junto con la trazabilidad, uno de los conceptos metroológicos fundamentales. Por otra parte, incertidumbre y precisión de un resultado analítico son términos muy relacionados, aunque quizás el término “incertidumbre” sea más globalizador, en el sentido de considerar todas las fuentes posibles de error que intervienen en el resultado final. El Vocabulario de Metrología Internacional evita el término “valor verdadero” en su nueva definición (ya que el “valor verdadero” no puede conocerse) y define la incertidumbre como “un parámetro, asociado al resultado de una medida, que caracteriza el intervalo de valores que puede ser razonablemente atribuido al mensurando”.

La incertidumbre ha pasado a ser parte misma de la ciencia. Desde los fenómenos en los sistemas caóticos (Braun, 1996; Sametband, 1994), hasta el famoso “principio” de Werner Heisenberg (Lindley, 2008), han puesto en jaque la credibilidad de la ciencia, han minado la creencia de que se puede develar el mundo físico con una precisión y un detalle sin límites. Igualmente, la complejidad constituye ahora un nuevo desafío para la ciencia. La investigación en matemática se está aplicando actualmente para explicar procesos fisiológicos y neurobiológicos rítmicos, como las arritmias cardíacas o los relojes biológicos y hasta en las ciencias sociales, como por ejemplo, en los mercados financieros (fenómenos en los que apenas logramos vislumbrar un poco de certidumbre).

Todavía tenemos problema para definir varias cantidades fundamentales, como la masa, la carga, el espín, o la energía. Por ejemplo, acerca de la luz le escribe Einstein a su amigo y consejero Michele Besso en 1951:

Todos los cincuenta años de cavilación consciente no me han acercado a una respuesta a la pregunta: ¿qué son los cuantos de luz? En efecto, hoy día hasta Juan de los Palotes cree que sabe la respuesta, pero simplemente se está engañando (Citada por De la Peña, 2004, p. 137).

## ¿Cómo hacer que nuestros estudiantes encaren los cambios acelerados y la percepción de incertidumbre?

Por lo tanto, podemos decir que siempre han existido épocas de cambios acelerados y de percepción de incertidumbre, pero habían sido atribuibles a poderes sobrehumanos, como los designios de los astros, a la voluntad divina, a “Los Elementos” o a “Las Fuerzas de la Naturaleza”. En la actualidad es la conciencia de la influencia humana sobre el futuro lo que hace percibirlos tan ominosos. Antes se culpaba al destino de las desgracias, ahora es el género humano el responsable, por acción u omisión (Olivé, 2007).

Las preguntas importantes hoy son: ¿Qué hacer para transformar los grandes objetivos de la educación? ¿Cómo lograr una formación flexible con la que los estudiantes puedan transformar y actualizar rápidamente lo que aprenden, a la velocidad de todos estos descubrimientos? José Antonio Chamizo (2009) nos dice frecuentemente que, con tales súbitos cambios del conocimiento, siempre hemos de enseñar no química, sino historia de la química, que no hay manera de ponerse al día para enseñar lo último: se necesitan leer unas 20 revistas cada día para alcanzar el 1% de la información química que se produce en el mundo (Schummer, 1999). Si nos conformamos con leer los resúmenes, entonces bastaría con consultar diariamente unas 200 páginas del *Chemical Abstracts*.

En la ponencia inaugural de Linda Darling-Hammond (2009) en la Conferencia anual de la *National Association of Research in Science Teaching* (NARST) de abril 2009, en Garden Grove, California, USA, nos dice que las expectativas del aprendizaje de las ciencias están cambiando y que hoy lo constituye el siguiente decálogo:

1. Aptitud para comunicarse;
2. Adaptabilidad para el cambio;
3. Capacidad para trabajar en grupo;
4. Preparación para resolver problemas;
5. Aptitud para analizar y conceptualizar;
6. Capacidad para meditar y mejorar el desempeño;
7. Aptitud para auto-administrarse;
8. Capacidad para crear, innovar y criticar;
9. Aptitud para involucrarse en aprender cosas nuevas, siempre;
10. Capacidad para cruzar las fronteras de los especialistas.

En este listado no vemos ningún contenido científico, pero sí un enfoque de educación moderno con las aptitudes y habilidades más deseadas para los estudiantes.

Yo voy a presentar aquí el que considero otro decálogo, pero de los paradigmas más valiosos para la enseñanza de la química, desde la educación básica hasta la superior, el cual no está fraseado en términos de capacidades o competencias, sino de grandes temas de didáctica. Vamos a irlos desmenuzando uno a uno en este texto:

1. Química de frontera;
2. Analogías;

3. Incertidumbre;
4. Indagación;
5. Modelos y modelaje;
6. Naturaleza, historia y filosofía de la química;
7. Competencias;
8. Riesgo;
9. Tecnologías de la comunicación y la información;
10. Afectividad: algo clave para la enseñanza.

## Química de frontera

Los profesores hemos de estar lo más al día posible en nuestros conocimientos disciplinares. Lo primero que debe hacer un profesor es dominar sus contenidos. Para dar una idea de lo que considero la frontera del conocimiento químico, he colocado siete ejemplos a continuación:

### 1. Nanociencia y nanotecnología

Resulta crucial el cambio en el número de átomos que ocupan la superficie con relación a los que están en el bulto del sólido cuando se pulveriza un material cualquiera. En un pedazo cúbico de lado  $L$  supongamos que tenemos 4096 átomos. De ellos solamente la tercera parte (1352) están en la superficie del cubo y la relación superficie a volumen de este cubo es 6/ $L$ . Procedemos a separar esos 4096 átomos en ocho cubitos más pequeños y ahora 58% de ellos (2386) están en la superficie de los ocho cubos y la relación superficie a volumen de este sistema ha crecido 16 veces y vale ahora 96/ $L$ . Si cada uno de los ocho cubos es separado a su vez en otros ocho cubitos, cambian notablemente los parámetros analizados: los 4096 átomos están ahora en sesenta y cuatro cubitos más pequeños y ahora 88% de ellos (3584) están en la superficie y la relación superficie a volumen de este sistema ha crecido otras 16 veces y vale ahora 1536/ $L$ .

La característica de los átomos superficiales es diferente de los del bulto del sólido como han demostrado Castro *et al.* (2003) por métodos de la mecánica cuántica de cúmulos metálicos. Por ello la naturaleza y las características de los nanomateriales son notablemente diferentes de las del sólido correspondiente.

Si uno preguntara al azar a ciudadanos que identificaran los retos presentes y futuros de carácter global con arreglo potencialmente tecnológico, la lista incluiría (Kulinowski, 2003):

- obtener energía limpia y barata;
- atender la demanda de agua potable;
- reducir la polución ambiental;
- incrementar la potencia computacional;
- atender el hambre mundial;
- proporcionar seguridad, y
- encontrar curas para diversas enfermedades, como el cáncer.

Nos dice Kulinowski que el campo de la nanotecnología pudiera enfrentar todos estos retos en unos pocos años.

### 2. Nanomateriales para biosensores

Los nanomateriales poseen propiedades físicas importantes,

tales como agregación corpuscular, fotoemisión, altas conductividades eléctrica y térmica y actividad catalítica. Con base en esas propiedades únicas, han recibido una atención notable en el terreno de las ciencias biomédicas, en las que pueden aprovecharse para la detección biomolecular, para aplicarlos como sensores, para la entrega de genes, la diagnosis clínica, etc. (Pandey, Datta & Malhotra, 2008).

### 3. Complejos luminiscentes

Los complejos metálicos luminiscentes son materiales utilizados para varias aplicaciones como iluminación, pruebas analíticas y láseres. Siempre habían sido caros y problemáticos ambientalmente, pero ahora con configuraciones electrónicas  $d^{10}$  se dan ejemplos nobles y baratos de ellos para Cu(I), Ag(I), Au(I), Zn(II) y Cd(II) (Barbieri, Accorsi & Armaroli, 2008).

### 4. Avances en el origen de la vida

Se han logrado cuatro avances recientes importantes:

- Las protocélulas de Jack Szostak.* Estructuras tipo célula que pudieron formarse a partir de materia grasa en la Tierra primitiva. Szostak, Bartel & Luigi (2001) publicaron un primer trabajo en *Nature* en donde proponen que en paralelo debieron formarse tanto la protocélula como su sistema genético. Dan una maravillosa definición de un sistema vivo: "un sistema sostenible, de replicación autónoma y capaz de la evolución darwiniana";
- Autoreplicación de ARN.* Gerald F. Joyce acaba de informar en *Science* a principios de 2009 que ha desarrollado dos tipos de moléculas de ARN que pueden promover la síntesis una de la otra a partir de cuatro nucleótidos de ARN (Lincoln & Joyce, 2009);
- Síntesis de nucleótidos.* Los prebióticos demostraron pronto la síntesis de la adenina (una base nitrogenada) a partir de las sustancias presentes en la atmósfera primitiva, pero ese gusto se vio limitado por la incapacidad de ligar una adenina a la ribosa. Powner, Gerland & Sutherland (2009), químicos de la Universidad de Manchester, Inglaterra, acaban de informar en *Nature* su descubrimiento de una ruta inesperada de sintetizar nucleótidos, en la cual en lugar de obtener separados sus elementos, se obtiene el nucleótido directamente;
- Explicación de lateralidad.* Los químicos del Imperial College de Londres dirigidos por Donna Blackmond han encontrado una manera fácil de convertir una mezcla de moléculas de ambas manos en una de las formas racémicas por ciclos de fundir y congelar (Klussmann, *et al.*, 2006).

### 5. Mal de Alzheimer

La enfermedad de Alzheimer está asociada con la presencia de placas de la proteína  $\beta$ -amiloide, y de marañas (filamentos helicoidales) de neurofibrillas intracelulares de la proteína- $\tau$  en la corteza cerebral y en la materia gris subcortical (Mencacci & Cerveri, 2008).

La producción desmedida de la proteína  $\beta$ -amiloide más la presencia de inflamación y de radicales libres ayuda a la for-

mación de las placas. Es notable el número de artículos químicos que tratan el mal de Alzheimer y llenan las páginas del *Journal of Physical Chemistry B* (ver por ejemplo Singh, Barman & Prabhakar, 2009; Murray, *et al.*, 2009; Francisco-Márquez y Galano, 2009).

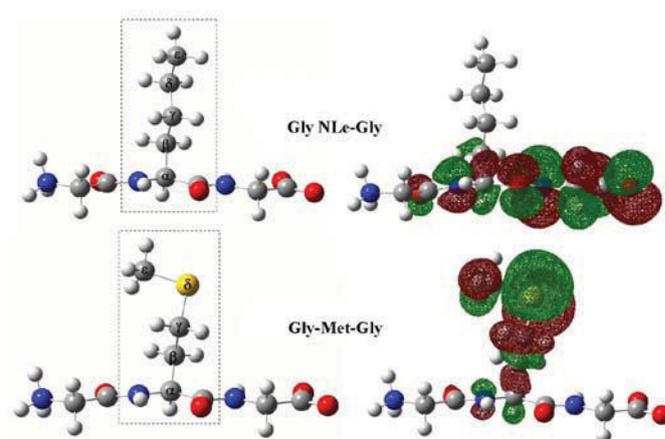
La metionina ha sido asociada al desarrollo del mal de Alzheimer. Se ha informado que eliminar la Met35 de la proteína  $\beta$ -amiloide o sustituirla por otro aminoácido similar (como la norleucina, por ejemplo) inhibe la formación de agregados del péptido  $\beta$ -amiloide y por tanto su neurotoxicidad. Francisco-Márquez y Galano (2009) nos dan una explicación basada en orbitales frontera (véase la ilustración 2).

### 6. Productos naturales: ¿en la frontera todavía?

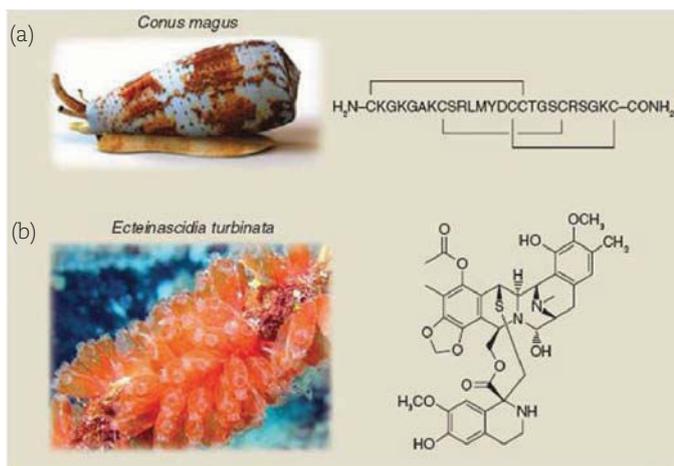
En un artículo reciente en la revista *Science*, Li y Vederas (2009) se preguntan si ya pasó el tiempo del aprovechamiento de los recursos naturales o si se trata de una frontera sin final. Nos ofrecen los casos de dos medicamentos tomados de productos naturales marinos (ver la ilustración 3: el primero se utiliza como medicamento para el dolor crónico y el segundo para la Quimioterapia antineoplásica).

### 7. El genoma humano

En febrero de 2001 se avisó la culminación del Proyecto Genoma Humano. Como resultado se obtuvo la secuencia completa de los 3200 millones de nucleótidos o letras (A, G, T, C) que lo componen, el mapa que ubica a los cerca de 40 mil genes que ahí se albergan y el análisis de cerca de 1000 genes causantes de enfermedades genéticas. Los retos inmediatos a los que se enfrenta la medicina genómica incluyen el conocimiento y análisis de las secuencias que incrementan el riesgo o la susceptibilidad para desarrollar enfermedades multifactoriales, así como el estudio de su frecuencia dentro de las po-



**Ilustración 2.** Orbitales frontera HOMO del tripéptido de glicina-norleucina-glicina (arriba) y del glicina-metionina-glicina (abajo), en donde es notable que hay muy poca contribución del aminoácido central en el superior y una gran contribución del azufre en el inferior, con lo que puede haber con mayor certeza un ataque del radical  $\cdot\text{OH}$  a este último (cortesía de Annia Galano).



**Ilustración 3.** (a) La molécula de Zinocotide a la derecha, un polipéptido, que salió a la venta en 2004 con el nombre de Prialt, extraído del caracol *Conus magus*. (b) La *Ecteinascidia turbinata* es un animal del filum Tunicados (a veces llamados Urocordados) del cual se extrajo el trabectedín (a la derecha abajo) y se vende desde 2009 como el medicamento Yondelis.

blaciones (Jiménez Sánchez, 2004). La medicina genómica, si bien tiene un gran potencial de desarrollo, nos enfrenta a nuevos retos éticos, legales y sociales inherentes al uso de información tan íntima como la genómica.

### Analogías

Raviolo & Garritz (2009) interpretan ‘analogía’ como un concepto que representa la visualización de un fenómeno, ente o proceso, a través de la comparación analógica entre dos campos: uno de ellos conocido y familiar al que aprende, y el otro parcialmente desconocido, el campo de la ciencia. De esta forma una analogía incluye:

- Un campo científico poco familiar o desconocido (blanco, objetivo, objeto);
- Un dominio familiar (análogo, base, fuente) para el sujeto que va a aprender, y
- Un conjunto de relaciones que se establecen entre (a) y (b) o una serie de procesos de correspondencia entre los componentes de ambos campos

Nos indican Harrison y Treagust (2006) que esto es especialmente importante usarlo en el aprendizaje por indagación, “donde las conexiones se construyen entre un contexto familiar y otro científico no intuitivo. La indagación incluye lo siguiente: se identifican nuevas preguntas y problemas; se planean las actividades; los estudiantes investigan dichas preguntas y problemas; el profesor discute los datos y sus interpretaciones con los estudiantes, y el profesor responde preguntas, provee información ‘necesaria-para-saber’ y algunas veces ofrece alguna analogía”. Un ejemplo claro de la validez del uso de analogías en la enseñanza puede visualizarse en la siguiente frase de MariKay Orgill y George Bodner:

Ninguna situación con la que nos encontramos es exactamente como una situación con la que nos hemos encontrado previamente, y nuestra capacidad de aprender y sobrevivir en el mundo está basada en nuestra capacidad de encontrar similitudes entre situaciones pasadas y presentes, y utilizar el conocimiento que hemos ganado de situaciones en el pasado para manejar las situaciones actuales. La analogía es poderosa ya que nos permite crear similitudes para una variedad de propósitos, tales como resolver problemas, crear explicaciones o construir argumentos. (Orgill & Bodner, 2005).

Los profesores de química seguiremos empleando muchas analogías durante nuestras clases, como por ejemplo, la de Licata (1988) que pretende la comprensión del enlace covalente mediante su comparación con el sándwich del lunch (compartir equilibradamente el sándwich es como un enlace covalente puro, compartirlo desigualmente es el enlace covalente polar y robarle el sándwich a alguien es como el enlace covalente coordinado); la de la cerradura y la llave para representar el sustrato y el catalizador en reacciones bioquímicas (Orgill & Bodner, 2006); o el baile de parejas para referirnos al reactivo limitante o al equilibrio químico (Hildebrand, 1946; Sarantopoulos & Tsapalis, 2004); o la docena del químico para hablar metafóricamente del mol (Kolb, 1978; Gabel & Sherwood, 1984); o el paso por la montaña para referirnos a la energía de activación de una reacción, su exo o endotermicidad (Treagust & Chittleborough, 2001).

También el autor de este trabajo ha aportado una analogía (Garritz, 1997) entre la centena o así disponibles para la enseñanza del equilibrio químico (véase la ilustración 4).

### Incertidumbre

Según el autor de este trabajo ya es hora de hablar de incertidumbre en la clase de química.

Niaz (2005) nos presenta un decálogo sobre cómo conceptualizar la naturaleza de la ciencia, de acuerdo con las ideas más recientes de la filosofía científica, y propone su inclusión en los textos, lo cual puede facilitar una mayor comprensión conceptual de los estudiantes (a algunos profesores este tipo de ideas les parece una franca provocación, que debe eliminarse del contexto de la clase):

- Las teorías científicas son tentativas.
- Las teorías no se convierten en leyes aun con evidencia empírica adicional.
- Toda observación está impregnada de una teoría.
- La ciencia es objetiva, sólo en cierto contexto del desarrollo científico.
- La objetividad en las ciencias proviene de un proceso social de validación competitivo, por la evaluación crítica de los pares.
- La ciencia no se caracteriza por su objetividad, sino por su carácter progresivo —cambios progresivos de problemática.
- El progreso científico está caracterizado por conflictos,

competencias, inconsistencias y controversias entre teorías rivales.

8. Los científicos pueden interpretar los mismos datos experimentales en más de una forma.
9. Muchas de las leyes científicas son irrelevantes y en el mejor de los casos son idealizaciones.
10. No hay un método científico universal que indique los pasos a seguir.

Richard Feynman (1988) es uno de los científicos que más ha insistido en el valor de la incertidumbre en la ciencia. Nos dice, por ejemplo:

El científico tiene mucha experiencia con la ignorancia, la duda y la incertidumbre, y esa experiencia es de gran importancia, pienso yo. Cuando un científico no sabe la respuesta a un problema, él es un ignorante. Cuando tiene una corazonada acerca de cuál es el resultado, es incierto. Y cuando está seguro de cuál va a ser el resultado, todavía le puede quedar duda. Es de importancia capital para progresar reconocer nuestra ignorancia y dejar lugar a la duda. El conocimiento científico es un conjunto de aseveraciones con grado variable de certidumbre —la mayoría inseguras, algunas casi seguras, pero ninguna absolutamente segura.

Ilya Prigogine, otro Premio Nobel, ahora de Química en 1977, tiene varias citas famosas:

The future is uncertain... but this uncertainty is at the very heart of human creativity (Prigogine, 1997).

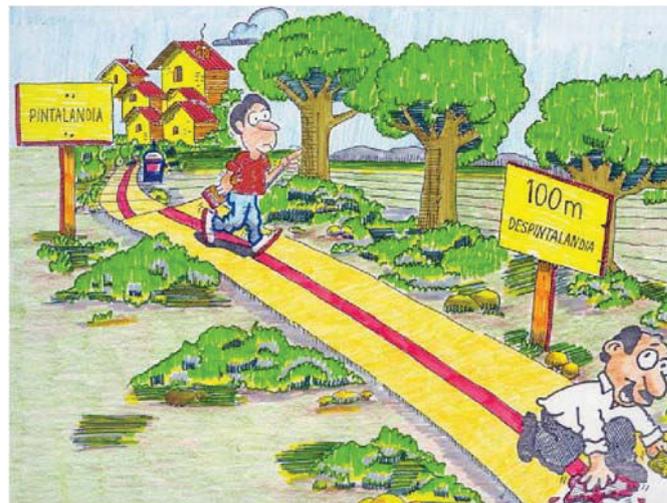
...la racionalidad ya no puede seguir siendo identificada con la certeza, ni tampoco la probabilidad con la ignorancia (Prigogine, 1986, p. 183).

En el libro *La Fin des Certitudes*, Prigogine sugiere un nuevo principio de incertidumbre, no como resultado de los límites del conocimiento humano sino de la naturaleza de la realidad física misma, que parece estar esencialmente indeterminada.

Edgar Morin, el autor de 'la complejidad' como tema primordial del conocimiento, nos dice que la incertidumbre debe ser más frecuente en nuestro razonamiento científico y que sólo existe certidumbre escasamente en la ciencia:

Las ciencias nos han hecho adquirir muchas certezas, pero de la misma manera nos han revelado innumerables campos de incertidumbre. La conciencia del carácter incierto del acto cognitivo constituye la oportunidad para llegar a un conocimiento pertinente, el cual necesita exámenes, verificaciones y convergencia de indicios [...] Repitémoslo una vez más: el conocimiento es navegar en un océano de incertidumbres a través de archipiélagos de certezas.

Una nueva conciencia empieza a surgir: el hombre, enfrentado a las incertidumbres por todos los lados, es arrastrado hacia una nueva aventura. Hay que aprender a enfrentar las incertidumbres puesto que vivimos en una época cambiante donde los valores son ambivalentes, donde todo está ligado. Es por eso que la educación del futuro

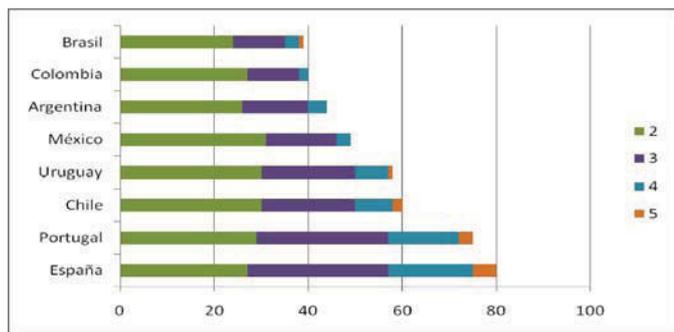


**Ilustración 4.** Analogía del pintor y el despintor para representar el equilibrio químico (Garritz, 1997). El pintor se pone a pintar la línea de la carretera que va de Pintalandia a Despintalandia, pero el menso deja la cubeta con pintura en su pueblo, así que le toma cada vez más tiempo avanzar en su tarea, conforme se compromete en ella. Por su parte, el despintor se dedica a tomar con una estopa el removedor de pintura (que también deja en su pueblo el muy tonto) y procede a llegar a la punta de la pintura y decolorar la línea. En función de las velocidades de caminar y la efectividad del pintor y el despintor (la longitud que logran pintar o despintar cada vez que llegan al extremo) llega un momento en que la longitud pintada casi no cambia (y no necesariamente se encuentra a la mitad entre ambos pueblos). Se ha alcanzado el equilibrio. La pintura del pintor representa la conversión de reactivos a productos y el borrado del despintor la transformación de productos en reactivos. El primero avanza rápidamente al principio, pero va disminuyendo su velocidad conforme se aleja de la cubeta (la concentración de los reactivos ha disminuido lo suficiente para hacer menos probable su conversión). El estado del equilibrio es un punto dinámico en que los reactivos siguen convirtiéndose en productos y los productos en reactivos, pero ya casi no cambia su composición (la longitud pintada de la línea).

debe volverse sobre las incertidumbres ligadas al conocimiento [...] las incertidumbres que han aparecido en las ciencias físicas [...], en las ciencias de la evolución biológica y en las ciencias históricas (Morin, 1999).

### Competencias

Esta palabrita está de moda en todos los aspectos educativos, pero hay que acotar muy bien su significado. Desde el siglo XV nos encontramos con dos verbos en castellano: "*competir*" y "*competer*" que, proviniendo del mismo verbo latino ("*competerere*"), se diferencian significativamente (Urzúa & Garritz, 2008):



**Ilustración 5.** Resultados de PISA 2006 en España, Portugal y los seis países encuestados de Latinoamérica. Están ordenados en orden creciente de la suma de los niveles  $\geq 2$ . Véase cómo va disminuyendo la proporción de alumnos en los niveles 0 y 1 (la diferencia a 100), de 61% en Brasil a 20% en España. Ese dato en México es un 51%.

1. “*Competer*”: pertenecer o incumbir, dando lugar al sustantivo «competencia» y al adjetivo «competente» (apto, adecuado).
2. “*Competir*”: pugnar, rivalizar, dando lugar también al sustantivo «competencia», «competitividad», y al adjetivo «competitivo».

Vemos que ‘competencia’ puede derivar de ambos verbos, lo cual complica entender su significado en función de la frase concreta expresada con el término. El punto de vista del autor de este trabajo es que debemos cultivar más el *competer*, y menos el *competir*.

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) ha tomado la batuta con el concepto de ‘competencias’ y lo ha utilizado en los tres concursos PISA que se han efectuado con estudiantes en cada vez más países. Nos dice la OCDE en el documento *La definición y selección de competencias clave* (DeSeCo):

Una competencia es más que conocimientos y destrezas. Involucra la habilidad de enfrentar demandas complejas, apoyándose en y movilizándolo recursos psicosociales (incluyendo destrezas y actitudes) en un contexto en particular. Por ejemplo, la habilidad de comunicarse efectivamente es una competencia que se puede apoyar en el conocimiento de un individuo del lenguaje, destrezas prácticas en tecnología e información y actitudes con las personas que se comunica (OCDE, 2005).

El concurso PISA 2006 se encargó de medir las competencias y actitudes hacia la ciencia.

PISA 2006 define la competencia científica en referencia a las siguientes habilidades del individuo:

- Conocimiento científico y utilización de ese conocimiento para identificar cuestiones, adquirir nuevos conocimientos, explicar fenómenos científicos y sacar conclusiones a partir de pruebas en problemas relacionados con las ciencias:

- *Comprensión de los rasgos característicos de las ciencias como forma humana de conocimiento e investigación.*
- *Conciencia de cómo las ciencias y la tecnología dan forma a nuestros entornos materiales, intelectuales y culturales.*
- *Voluntad de involucrarse como ciudadano reflexivo en cuestiones relacionadas con las ciencias y con las ideas científicas* (OCDE, 2007, p. 39).

El máximo nivel contemplado de la competencia científica es el 6, con la descripción: “Los estudiantes pueden consistentemente identificar, explicar y aplicar el conocimiento científico y el conocimiento sobre la ciencia en una variedad de situaciones complejas de la vida real. Relacionan distintas fuentes de información y explicación, y hacen uso de evidencias a partir de esas fuentes para justificar sus decisiones”.

El nivel mínimo es 0, que implica desconocimiento, mientras que el nivel 1 es el que se describe como: “Los estudiantes tienen un conocimiento científico limitado que sólo es aplicable a pocas situaciones familiares. Dan explicaciones científicas obvias que se obtienen directamente de la evidencia dada”. En la ilustración 5 se colocan los resultados de porcentaje de los niveles superiores o iguales al 2 para los estudiantes de los ocho países iberoamericanos que participaron en el concurso PISA 2006.

## Indagación

En los Estados Unidos los Estándares Nacionales de la Educación Científica definen a la indagación científica como: “Una actividad polifacética que implica hacer observaciones; plantear preguntas; examinar libros y otras fuentes de información para ver qué es lo ya conocido; planificar investigaciones; revisar lo conocido hoy en día a la luz de las pruebas experimentales; utilizar instrumentos para reunir, analizar e interpretar datos; proponer respuestas, explicaciones y predicciones, y comunicar los resultados” (NRC, 1996, p. 23).

Martin-Hansen (2002) la define como “el trabajo que hacen los científicos cuando estudian la naturaleza, al proponer explicaciones que incluyan evidencias reunidas a partir del mundo que los rodea. El término también incluye las actividades de los estudiantes—tales como plantear preguntas, planear investigaciones y revisar lo ya conocido a la luz de la evidencia experimental—, lo cual es un reflejo de lo que los científicos hacen” y la caracteriza de varios tipos:

- **Indagación abierta:** Tiene un enfoque centrado en el estudiante que empieza por una pregunta que se intenta responder mediante el diseño y conducción de una investigación o experimento y la comunicación de resultados.
- **Indagación guiada:** Donde el profesor guía y ayuda a los estudiantes a desarrollar investigaciones indagatorias en el salón o el laboratorio.
- **Indagación acoplada:** La cual integra la indagación abierta y la guiada.
- **Indagación estructurada:** Es una indagación dirigida primordialmente por el profesor, para que los alumnos lleguen a puntos finales o productos específicos.

Mientras tanto, en la Unión Europea, el llamado “Informe Rocard” pretendió conocer el saber-cómo y las buenas prácticas que podrían traer un cambio radical en el interés de la gente joven por la ciencia. Su recomendación más importante es la “Educación en ciencia basada en la indagación”, lo que concluyen:

Una reversa a la pedagogía de la enseñanza de la ciencia escolar nos dará los medios para incrementar el interés en la ciencia: de principalmente deductiva hacia los métodos basados en la indagación (Rocard, *et al.*, 2007).

Recientemente hemos reconocido siete actividades propias de la indagación (Garritz, Labastida, Espinosa y Padilla, 2009):

1. Identificar y plantear preguntas que puedan ser respondidas mediante la indagación;
2. Definir y analizar bien el problema a resolver e identificar sus aspectos relevantes;
3. Reunir información bibliográfica para que sirva de evidencia;
4. Formular explicaciones al problema planteado, a partir de la evidencia;
5. Plantear problemas de la vida cotidiana y tocar aspectos históricos relevantes;
6. Diseñar y conducir trabajo de investigación a través de diversas acciones;<sup>2</sup>
7. Compartir con otros mediante argumentación lo que ha sido aprendido a través de indagación.

Indagación y argumentación son dos de las características de las clases del profesor Guillermo Barraza, premiado con el “Andrés Manuel del Río-2009” en docencia por la Sociedad Química de México. Adicionalmente, es de mencionarse aquí el trabajo de Hugo Torrens y colaboradores, quienes han venido sometiendo a los alumnos a una rica estancia experimental de investigación desde sus estudios de licenciatura, que en ocasiones ha concluido con sus exámenes doctorales después de varios años en una mezcla de gozo y responsabilidad (Cruz-Garritz, Chamizo y Torrens, 1989).

---

<sup>2</sup> Lo cual incluye: Reflexionar sobre las observaciones y fomentar la búsqueda de patrones en la información; Generar relaciones hipotéticas y evidencias entre las variables; Postular factores causales potenciales; Evaluar la consistencia empírica de la información; Hacer uso de analogías y/o de la intuición para ayudar a conceptualizar los fenómenos; Formular y manipular modelos físicos y mentales; Utilizar herramientas apropiadas y técnicas para reunir, analizar e interpretar datos; Pensar crítica y lógicamente para desarrollar predicciones, explicaciones, y modelos empleando las evidencias; Coordinar los modelos teóricos con la información; Evaluar las explicaciones alcanzadas, con algún modelo científico; y finalmente Comunicar los hechos y los procedimientos científicos empleados enfrente de la clase.

## Modelos y modelaje

Empecemos con un par de definiciones del concepto de ‘modelo’:

Un modelo puede definirse como una representación simplificada de un objeto, un acto, un proceso o una idea producida con el propósito específico de dar una explicación de esa entidad. El modelaje —el proceso continuo y dinámico de crear, probar y comunicar modelos— es una habilidad central para la indagación científica (Maia & Justi, 2009).

Los modelos (m) son representaciones, basadas generalmente en analogías, que se construyen contextualizando cierta porción del mundo (M), con un objetivo específico (Chamizo, 2009).

La misma Rosaura Justi nos dice que “los modelos juegan un papel vital en la química porque pueden servir para un amplio espectro de funciones. Pueden representar fenómenos complejos, hacer abstracciones más fácilmente visualizables, posibilitar hacer predicciones, dar bases para interpretar resultados experimentales y, lo más importante, permitir concebir explicaciones... El fenómeno representado puede ser un objeto (*e.g.* un aparato de destilación), un acontecimiento (*e.g.* colectar un destilado requerido), un proceso (*e.g.* la separación progresiva de tipos de moléculas) o ideas (*e.g.* la distribución de las velocidades moleculares en una mezcla)” (Justi & Gilbert, 2006).

El modelo cinético-corpúscular de los gases, el modelo atómico-molecular de Dalton, el modelo de ión, el modelo estructural de los diferentes tipos de sólidos, el modelo de enlace químico, los sucesivos modelos atómicos, el modelo de reacción química (en sus aspectos corpúscular, termoquímico, cinético, de equilibrio, etc.), los diferentes modelos o teorías de ácido y base, etc., son ejemplos de diferentes modelos que deben ser construidos en un curso de química general (Caamaño, 2007, p. 28).

Por nuestra parte, hemos investigado la manera como dieciséis profesores latinoamericanos del bachillerato enfrentan el reto de enseñar que el Universo está constituido de pequeñas partículas, mediante el estudio de su conocimiento pedagógico del contenido. De esta manera pensamos que pueden aprovecharse sus estrategias declaradas para el modelaje en la formación de nuevos profesores (Garritz, Porro, Rembado & Trinidad, 2007).

Igualmente, hemos avanzado en la investigación de las diversas concepciones epistemológicas y modelos con los que profesores universitarios enseñan el concepto de cantidad de sustancia, desde una perspectiva equivalentista hasta una atomista. Se ha empleado el modelo del perfil conceptual de Mortimer (1995) para caracterizar la enseñanza del tema (Padilla, Ponce de León, Rembado & Garritz, 2008).

## Naturaleza, historia y filosofía de la química

Resulta de una importancia crucial que los químicos razonemos sobre los significados más profundos en nuestra ciencia.

Cavilar sobre lo más elemental nos va a conducir a otro estadio del conocimiento, uno en el que sentemos las bases de tantas cuestiones que siguen al gairete en la química. De eso se encarga la Filosofía de la Química y es una actividad que debemos realizar cuanto antes y colectivamente.

Hay dos revistas que tienen poco más de diez años y que tratan este tema: *Foundations of Chemistry* (editada por Eric Scerri desde la Universidad de California en Los Ángeles, USA) y *Hyle International Journal for Philosophy of Chemistry* (editada por Joaquim Schummer de la Universidad de Karlsruhe, Alemania). Scerri (2000) nos habla de los tópicos que más han llamado la atención de los filósofos de la química:

- 1) La cuestión de la reducción de la química. Esta reducción no tiene carácter químico, sino que se refiere a una visión prevalente creciente que insiste en que las cuestiones profundas de esta ciencia sólo pueden resolverse mediante la aplicación de las teorías más fundamentales de la física.
- 2) La naturaleza de los modelos químicos, que proporciona una rica fuente de ejemplos a los filósofos que desean obtener una visión amplia de estas entidades.
- 3) El realismo de la estructura molecular. ¿En realidad las moléculas son como las pintamos? “¿Qué hacer si una molécula carece de estructura? ¿Qué hacer si una estructura molecular no puede explicarse por los modelos tradicionales?” (Cerro & Merino, 2009).

Chamizo (2009) recoge de Pickstone tres grandes tipos de formas de conocer que permiten esbozar el método de la química:

- **La historia natural** que se refiere a una primera clasificación de los componentes del mundo. Comprende la variedad de objetos naturales o artificiales, normales o patológicos. Es el espacio de las taxonomías: celestes, geológicas o biológicas y del lugar donde se vuelven públicas, los jardines botánicos, los zoológicos y los grandes museos de ciencias.
- **El análisis.** Si la variedad y el cambio son identificados por la historia natural, el análisis busca el orden por disección. El análisis aparece cuando los objetos se pueden ver como compuestos de ‘elementos’, o cuando los procesos se pueden ver como el ‘flujo’ de un ‘elemento’ a través de un sistema. Es el espacio de los laboratorios de anatomía, química, física e ingeniería y del lugar donde se vuelven públicos, las escuelas, institutos, politécnicos, hospitales y universidades. El análisis especifica la composición de lo ‘conocido’ para posteriormente, al poner juntos los ‘elementos’, crear nuevos objetos o fenómenos, mediante
- **La síntesis.** Si el análisis considera el separar cosas, la síntesis es sobre cómo ponerlas juntas. La síntesis, en la producción sistemática de la novedad. Es el espacio ‘privado’ del control, ya sea por motivos militares o económicos, de los laboratorios de biomedicina y farmacia, de diseño de nuevos materiales o de física nuclear, así como del lugar donde se vuelven públicos, el complejo tecnocientífico industrial.

Pueden emplearse para analizar la educación toda una serie de términos introducidos por Kuhn en la historia y la filosofía de la ciencia, tales como:

- Inconmensurabilidad (Flores, Gallegos, Garritz & García, 2007).
- Ciencia (aprendizaje) normal.
- Revolución científica (como cambio conceptual en lo educativo).
- Paradigma.

Bell y Lederman (2003) nos recuerdan que los propósitos de un libro no pueden ser únicamente los de transmitir una serie de conocimientos científicos fríos, sino, a la par, encargarse de que los alumnos se lleven la idea de que el conocimiento y las ideas científicas tienen mérito y que debemos confiar en ellos. Para lograrlo, los profesores debemos convertirnos en fanáticos de la Naturaleza de la Ciencia (NdC). No existe una definición unívoca sobre NdC, he aquí, a continuación, sólo un par de ejemplos:

La NdC es un metaconocimiento sobre la ciencia que surge de las reflexiones interdisciplinarias realizadas desde la historia, la filosofía y la sociología por especialistas de estas disciplinas, pero también por algunos científicos insignes (Garritz, 2006).

The phrase “nature of science” typically refers to the epistemology of science, science as a way of knowing, or the values and beliefs inherent to scientific knowledge or the development of scientific knowledge (Lederman, 2004).

Los libros de texto tradicionales sólo desarrollan conocimientos científicos y se rigen por la lógica interna de la ciencia, sin preguntarse acerca de qué es ésta, cómo funciona internamente, cómo se desarrolla, sobre el origen de los conocimientos, de su fiabilidad, de cómo se obtuvieron, si ello ocurre con cooperación y colaboración, qué implicaciones tiene el juicio de los pares, para qué se utilizan, y así. Hace falta desarrollar libros que consideren la NdC de manera explícita.

Vázquez, Acevedo y Manassero (2004) nos hablan de todo un conjunto de cuestiones que reúne la NdC:

La NdC incluye la reflexión sobre los métodos para validar el conocimiento científico, los valores implicados en las actividades de la ciencia, las relaciones con la tecnología, la naturaleza de la comunidad científica, las relaciones de la sociedad con el sistema tecnocientífico y las aportaciones de éste a la cultura y al progreso de la sociedad [...] También se deberían entender como propios de la NdC todos aquellos asuntos que van más allá de los productos o resultados de la ciencia —los contenidos fácticos y conceptuales—, tales como los procesos y diseños de la ciencia, los valores que impregnan a éstos, las relaciones mutuas entre ciencia, tecnología y sociedad, las relaciones sociales internas a la comunidad científica, las relaciones entre la ciencia escolar y la ciencia en elaboración, etcétera.

## Riesgo

Riesgo es “una situación o suceso en el cual se pone en juego algo valioso para los seres humanos, y donde el resultado es incierto” (Jaeger, Renn, Rosa & Webler, 2001). Otra autora nos dice que “es la probabilidad de daño por la decisión que se toma frente a un peligro para ganar algo a cambio” (Arjonilla, 2001). Parece que la palabra viene del latín *resgare* que se usaba para describir la navegación marítima peligrosamente cercana a los acantilados o riscos; para llegar más rápido, se arriesgaba.

Resulta imprescindible incluir en la educación la noción de riesgo, ya que: “Para todo tipo de riesgo que afecte intereses colectivos de un sector de la sociedad o de la naturaleza, es éticamente indispensable la participación pública en el proceso que va de la identificación a la gestión del riesgo” (Olivé, 2007).

Generalmente, la educación y la opinión pública han quedado fuera de la toma de decisiones sobre el riesgo. Los profesores han contemplado el riesgo más allá de su dominio profesional, como algo que sólo una elite de profesionales y técnicos dentro de la academia, el gobierno o la industria puede manejar. Hoy resulta importante que los profesores cambien su punto de vista e incluyan el riesgo como tema de sus clases. En el caso de la química ello puede lograrse con la microescala o la química verde o sustentable, que es útil para reducir los peligros, prevenir y mitigar los riesgos (Garritz, 2009b).

La reciente incorporación de la Química Verde o Química Sustentable en los planes de estudio de la enseñanza profesional y del bachillerato nos ofrece la oportunidad de abordar el estudio del riesgo. Ciertas reacciones químicas constituyen un peligro que puede dañarnos y resulta riesgosa su realización. La decisión de realizar reacciones promovidas por la Química Verde previene el riesgo porque se aminora la vulnerabilidad, el peligro de las mismas o de sus subproductos.

Hay que poner a los productos químicos en la ruta de una mejor evaluación de riesgos. El pasado verano, los investigadores del Programa Nacional de Toxicología de los Estados Unidos propusieron investigar con ratones los efectos del etilhexil metoxicinamato, un compuesto que contienen prácticamente todos los bloqueadores de luz solar, pero que posee un riesgo, el de ser levemente estrogénico. Pero ¿es trasladable el resultado del efecto de ese compuesto sobre muchas generaciones de ratones al caso humano? ¿No tenemos mejores pruebas para evaluar la toxicidad real de los compuestos químicos? Por ejemplo, ¿no podemos aplicar ensayos rápidos sobre células humanas y extrapolar de allí su toxicidad con análisis estadísticos avanzados? Sabemos que la transición de una a otra forma de proceder no será rápida ni simple. Va a haber que hacer investigaciones costosas (mil a dos mil millones de dólares) durante una o dos décadas para estar seguros que esas pruebas pueden reemplazar a las de los ratones (Stokstad, 2009).

Sin duda otro aspecto en el que tiene que ver la química y está relacionado con un gran riesgo es el calentamiento global

(Arjonilla & Garritz, 2007). El 2 de febrero de 2007 el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), establecido conjuntamente por la “World Meteorological Organization” y por el “United Nations Environment Programme” desde 1988, dio a luz su cuarto informe de evaluación de las causas, impactos y posibles estrategias de respuesta al cambio climático, con una serie de alertas sobre lo que nos estamos jugando por este efecto que, con una altísima probabilidad, se adjudica al ser humano. El diagnóstico y el tratamiento del cambio climático plantean una crisis y, como tal, implican un riesgo y una oportunidad. Tanto existe el riesgo a nivel mundial de padecer las consecuencias cada vez más graves del calentamiento global, como existe también la oportunidad de enriquecer la calidad de vida en el proceso de mitigación y adaptación al cambio climático. La visión de una crisis como riesgo y oportunidad es el aprendizaje general más trascendente tanto para los educadores como para los estudiantes.

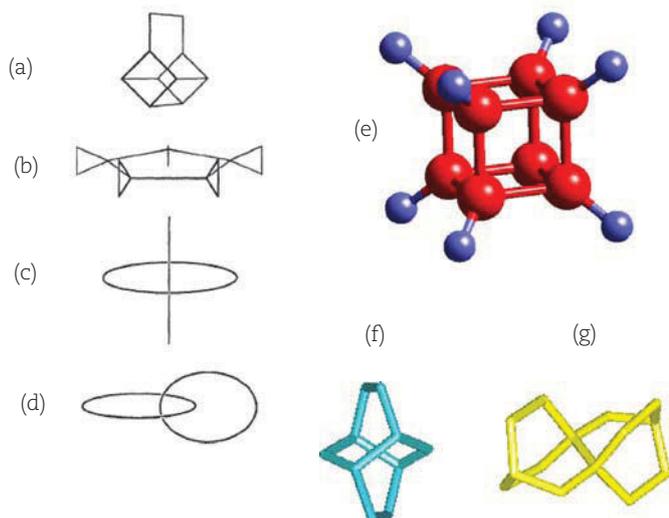
La revista *Science* del 25 de septiembre de 2009 incluye un conjunto de ocho artículos sobre cómo secuestrar el CO<sub>2</sub> para que no vaya a la atmósfera a incrementar la concentración de los gases invernadero (el tema de ese número es “Carbon Capture and Sequestration” y viene un mapa con los doce proyectos en curso que están investigando a dónde va a parar el dióxido de carbono realimentado a la Tierra; AAAS, 2009). Los ocho artículos vienen encabezados por la editorial de Jesse Smith, Fahrenkamp-Uppenbrink, & Coontz (2009) con el título “Limpiando el aire”, en la que nos recuerdan que fue Svante Arrhenius en 1895 quien pronosticó cómo las variaciones en las concentraciones de los gases traza de la atmósfera —particularmente el CO<sub>2</sub>— podrían influir en el balance térmico de la Tierra.

En la editorial del cuarto número de *Educación Química* de 2007 concluimos que hay cuatro cuestiones en las que podemos participar los docentes de la química con relación al riesgo del cambio climático:

1. Destacar el factor de la incertidumbre dentro de la educación;
2. Aceptar la complejidad como constituyente de todos los fenómenos ecológicos;
3. Refutar en la mente estudiantil el mito de una ciencia libre de valores; y
4. No propiciar la inacción al alarmar en lugar de alertar.

## Las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC)

Según Giordan y Gois (2009), la Química tuvo su evolución a partir de un profundo conocimiento basado en lenguaje algebraico y verbal, hacia un lenguaje pictórico internacional, donde la percepción del universo de las partículas atómicas, moleculares y supramoleculares depende de la memoria visual, de la imaginación visual y del procesamiento mental de la información visual. Por eso hoy la información visual juega un papel central en la enseñanza de la química. Estos autores nos relatan cómo han ido cambiando los ambientes virtuales para la enseñanza/aprendizaje de la química entre 1994 y



**Ilustración 6.** Objetos comunes y moléculas: (a) Una canasta, de donde proviene el nombre para el canastano; (b) Un rotor y el rotaxano; (c) Una rueda sobre un eje y el rotaxano; (d) Dos eslabones de una cadena y el catenano; (e) Un cubo y el cubano,  $C_8H_8$  (ésta sí es la representación molecular); (f) Twistano, y (g) Geminiano.

2005: 1994, 4M:CHEM; 1996, VisChem; 1997, CHEMMAT; 1998, ChemViz; 2000, SMV:Chem; 2001, eChem; 2002, ChemSense; 2002, ChemDiscovery; 2003, CHEMnet; 2003, Connected Chemistry; 2004, Chemical Change; 2004, Molecular Workbench, y 2005, Constructor.

Schummer (2006), uno de los más connotados filósofos de la química nos dice con relación al carácter visual de la química moderna, que la producción de “máquinas moleculares” se ha inspirado en el fenómeno estético de ciertas imágenes que se refieren ya sea a moléculas o a objetos comunes, lo que liga simbólicamente ambos mundos. Nos presenta alguno de los ejemplos de la ilustración 6.

La evolución de las técnicas computacionales en la última década ha traído nuevas oportunidades para desarrollar ambientes virtuales para el aprendizaje, los cuales podrán cambiar las formas de presentar y visualizar el conocimiento científico. (Jiménez y Núñez, 2009).

### Afectividad: algo clave para la enseñanza

La enseñanza está altamente cargada de sentimientos, suscitada y dirigida no sólo hacia personas, sino también hacia valores e ideales. En particular, las reacciones afectivas que existen detrás de los practicantes de la enseñanza de la ciencia, tanto en su trabajo como en todo lo que los rodea, logran la identificación de los profesores con su profesión (Garritz, 2009a).

Un par de frases acerca de la importancia de considerar los aspectos afectivos en la investigación sobre la enseñanza y el aprendizaje:

“De nada sirve que el entendimiento se adelante si el corazón se queda”: Baltasar Gracián (1601-1658).



**Ilustración 7.** Nieswandt (2007) llega a la conclusión de que el autoconcepto es el factor más importante en la comprensión conceptual postinstruccional de los estudiantes, le sigue el factor del interés y en tercer grado las actitudes hacia esta ciencia.

“La educación... ni empieza ni termina en los territorios de la razón. Abraza otras formas de desarrollo de nuestro espíritu”, como las inteligencias múltiples y la inteligencia emocional (Latapí, 2007).

Empiezan a aparecer artículos que tocan aspectos afectivos en la educación química (Bauer, 2005, 2008; Nieswandt, 2007, ver la ilustración 7). Toca diversos tópicos y conceptos, como los siguientes:

- Auto-concepto (Evaluación que hace un individuo con respecto a sí y que mantiene habitualmente).
- Actitudes (Predisposición aprendida para responder positiva o negativamente ante algo).
- Emociones (Las respuestas afectivas caracterizadas por una alta intensidad y activación o *arousal* fisiológico que experimentan los alumnos en la clase).
- Interés (Predisposición individual de asistir a ciertos eventos o de ser atraído hacia ciertas actividades).

Por lo tanto, es importante empezar con la construcción de las conexiones entre las componentes motivacionales y cognitivas del aprendizaje estudiantil (Pintrich, Marx & Boyle, 1993, p.168). Estos autores dan una gran importancia a la motivación y otros aspectos afectivos para el aprendizaje (el cambio conceptual, que involucra pasar de las ideas previas a las ideas científicas). La raíz latina de la palabra “motivación” significa “moverse”; así, en este sentido básico el estudio de la motivación es el de la acción. Las teorías modernas de la motivación se enfocan específicamente sobre la relación de creencias, valores y metas con la acción. La motivación de ha-

cer algo por sí solo es intrínseca, mientras que la motivación de hacerlo como un medio para un fin es extrínseca. La motivación intrínseca reside en la tendencia humana de perseguir intereses y ejercitar capacidades.

Finalmente, nos dice Harrison (2006) que para que una analogía sea bien recibida por los estudiantes, requiere generar interés y motivación en ellos, de otra manera se hallarán marginalizados o frustrados, lo que va a reducir su participación en la discusión analógica. El interés y el compromiso son cruciales para el aprendizaje.

## Cierre

Hasta aquí ha llegado el desglose de los diez paradigmas considerados para la educación química del siglo XXI. Concluimos este escrito con un par de frases que constituyen un resumen de lo más importante considerado aquí, la incertidumbre y la filosofía de la química:

Los siglos anteriores siempre creyeron en un futuro, fuera éste repetitivo o progresivo. El siglo XX descubrió la pérdida del futuro, es decir su impredecibilidad [...] ahora el devenir está problematizado y lo estará para siempre. El futuro se llama incertidumbre.

Edgar Morin (1999)

La esencia de la química no sólo es descubrir sino inventar y, sobre todo, crear. ¡El libro de química no es sólo para ser leído, sino para ser escrito! Si fuera música ¡la pieza de química no sólo sería para ser ejecutada, sino para ser compuesta!

Jean-Marie Pierre Lehn (1995, p. 206)  
Premio Nobel de Química 1987

## Referencias

- AAAS, Carbon sequestration, *Science*, **325**(5948), 1644-5, September 25th, 2009.
- Arjonilla, E., *Cómo hablar de riesgo. Consideraciones Teóricas*, México: Fundación Mexicana para la Salud, 2001.
- Arjonilla, E. & Garritz A., Cambio climático. Lo que podemos hacer los educadores, *Educ. quim.*, **18**(4), 251-256, 2007.
- Barbieri, A., Accorsi, G. & Armaroli, N., Luminiscent complexes beyond the platinum group: The d<sup>10</sup> avenue, *Chem. Commun.*, 2008, 2185-2193.
- Bascuñán Blasset, A., La Química en 1906, *Educ. quim.*, **17**(3) 114-115, 2006.
- Bauer, C.F., Beyond "Student Attitudes": Chemistry Self-Concept Inventory for Assessment of the Affective Component of Student Learning, *Journal of Chemical Education*, **82**(12), 1864-1870, 2005.
- Bauer, C.F., Attitude towards Chemistry: A Semantic Differential Instrument for Assessing Curriculum Impacts, *Journal of Chemical Education*, **85**(10), 1440-1445, 2008.
- Bell, R.L. & Lederman, N.G., Understandings of the Nature of Science and Decision Making on Science and Technology Based Issues, *Science Education*, **87**, 352-377, 2003.
- Braun, E., Caos, *fractales y cosas raras*, Colección "La ciencia para todos" N° 150, México: Fondo de Cultura Económica, 1996.
- Caamaño, A., Modelizar y contextualizar el currículum de química: un proceso en constante desarrollo, en: Izquierdo, M., Caamaño, A. y Quintanilla, M. (eds.), *Investigar en la enseñanza de la química. Nuevos horizontes: contextualizar y modelizar*. (Capítulo 1. pp. 19-39), Barcelona: Departament de Didàctica de les Matemàtiques i de les Ciències Experimentals, 2007.
- Castro, M., Liu, S.R., Zhai, H.J. & Wang, L.S., Structural and electronic properties of small titanium clusters: A density functional theory and anion photoelectron spectroscopy study, *Journal of Chemical Physics*, **118**(5), 2116-2123, 2003.
- Cerro, M. y Merino, G., ¿Moléculas sin esqueleto? La oportunidad perfecta para revisar el concepto de estructura molecular, *Educ. quim.*, **20**(2), 187-191, 2009.
- Chamizo, J.A., Filosofía de la química: I. Sobre el método y los modelos, *Educ. quim.*, **20**(1), 6-11, 2009.
- Cruz-Garriz, D., Chamizo, J. A. & Torrens, H., Early research, *Journal of Chemical Education*, **66**(4), 320-321, 1989.
- Darling-Hammond, L., "Teaching and Learning for the 21st Century". Plenary session #1. NARST-2009 Conference, April 17th-21st, Garden Grove, CA, USA, 2009.
- De la Peña, L., *Cien años en la vida de la luz*, Colección "La ciencia para todos" No. 200, México: Fondo de Cultura Económica, 2004.
- Feynman, R.P., *What Do You Care What Other People Think?*, New York: W. W. Norton, 1988.
- Flores, F., Gallegos, L., Garriz, A. & García, A., Incommensurability and Multiple Models: Representations about Structure of Matter in Undergraduate Chemistry Students, *Science & Education*, **16**(7-8), 775-800, 2007.
- Francisco-Marquez, M. & Galano, A., Role of the Sulfur Atom on the Reactivity of Methionine toward OH Radicals: Comparison with Norleucine, *Journal of Physical Chemistry B*, **113**(10), 4947-4952, 2009.
- Gabel, D. & Sherwood, R.D., Analyzing difficulties with mole-concept tasks by using familiar analog tasks, *Journal of Research in Science Teaching* **21**(8), 843-851, 1984.
- Garriz, A., The Painting-Sponging Analogy for Chemical Equilibrium, *Journal of Chemical Education*, **74**(5), 544-545, 1997.
- Garriz, A., Naturaleza de la ciencia e indagación: cuestiones fundamentales para la educación científica del Ciudadano, *Revista Iberoamericana de Educación*, **42**, 127-152, 2006.
- Garriz, A., Porro, S., Rembado, M. y Trinidad, R., Latin-American teachers' pedagogical content knowledge of the particulate nature of matter, *Journal of Science Education*, **8**(2), 79-84, 2007.
- Garriz, A., La afectividad en la enseñanza de la ciencia, *Educ. quim.*, **20**(ext), 212-219, 2009a.
- Garriz, A., Química verde y reducción de riesgos, *Educ. quim.*, **20**(4), 394-397, 2009b.

- Garritz, A., Labastida, D.V., Espinosa, J.S. y Padilla, K., El conocimiento didáctico del contenido de la indagación. Un instrumento de captura, *Memorias del Congreso Nacional de Investigación Educativa*, en Veracruz, Ver., México, 21 a 25 de septiembre de 2009.
- Garritz, A., La enseñanza de la ciencia en una sociedad con incertidumbre y cambios acelerados. Conferencia inaugural del VIII Congreso Internacional de Investigación en Didáctica de las Ciencias, en Barcelona, el 7 de septiembre de 2009, *Enseñanza de las Ciencias*, en prensa.
- Giordan, M. y Gois, J., Entornos Virtuales de Aprendizaje en Química: una revisión de la literatura, *Educ. quím.*, **20**(3), 301-313, 2009.
- Harrison, A.G., The Affective Dimension of Analogy. Student interest is more than just interesting!, en: P.J. Aubusson, A.G. Harrison & S.M. Ritchie (eds.), *Metaphor and Analogy in Science Education*, pp. 51-63. The Netherlands: Springer, 2006.
- Harrison, A.G. & Treagust, D.F., Teaching and Learning with Analogies. Friend or Foe?, en P. J. Aubusson, A. G. Harrison & S. M. Ritchie (eds.), *Metaphor and Analogy in Science Education*, pp. 11-24. The Netherlands: Springer, 2006.
- Hildebrand, J., Catalyzing the approach to equilibrium, *Journal of Chemical Education*, **23**, 589-592, 1946.
- Jaeger, C.C., Renn, O., Rosa, E.A. & Webler, T., *Risk Uncertainty and Rational Action*. London: Earthscan Pub., 2001.
- Jesse Smith, H., Fahrenkamp-Uppenbrink, J. & Coontz, R. Clearing the air, *Science*, **325**(5948), 1641, September 25th, 2009.
- Jiménez, G. & Núñez-Cruz, E., Cooperación online en entornos virtuales en la enseñanza de la química, *Educ. quím.*, **20**(3), 314-319, 2009.
- Jiménez Sánchez, G., VII. El genoma humano. Implicaciones de la medicina genómica en México. *Gaceta Médica de México*, **140**(2), 260-263, 2004. Disponible de la URL: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0016-38132004000200033&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0016-38132004000200033&lng=en&nrm=iso)
- Justi, R. & Gilbert, J., The Role of Analog Models in The Understanding of the Nature of Models in Chemistry, en: P.J. Aubusson, A.G. Harrison & S.M. Ritchie (eds.), *Metaphor and Analogy in Science Education*, pp. 119-130. The Netherlands: Springer, 2006.
- Klussmann, M., Iwamura, H., Mathew, S.P., Wells, D.H., Pandya, U., Armstrong, A. & Blackmond, D.G., Thermodynamic control of asymmetric amplification in amino acid catalysis, *Nature*, **441**, 621-623, 2006.
- Kolb, D., The Mole, *Journal of Chemical Education*, **55**(11), 728-732, 1978.
- Kulinowski, K., *Nanotechnology: From "Wow" to "Yuck"?* Rice University, 2003. En la URL del museo de ciencias de Boston [http://www.mos.org/media/docs/Nanotech\\_Background.pdf](http://www.mos.org/media/docs/Nanotech_Background.pdf). Consultada el 6 de julio de 2009.
- Latapí, P., Texto al recibir el doctorado Honoris Causa en la Universidad Autónoma Metropolitana en 2007.
- Lederman, N.G., Syntax of nature of science within inquiry and science instruction, en: L.B. Flick, y N.G. Lederman (eds.), *Scientific inquiry and nature of science: implications for teaching, learning, and teacher education* (Chapter 14; pp. 301-317). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- Lehn, J.M., *Supramolecular Chemistry. Concepts and Perspectives*, Weinheim: VCH, 1995.
- Li, J. W.-H. & Vederas, J.C., Drug Discovery and Natural Products: End of an Era or an Endless Frontier?, *Science*, **325**, 161-165, July 10th 2009.
- Licata, K.P., Chemistry is like a..., *The Science Teacher*, **55**(8), 41-43, 1988.
- Lincoln, T.A. & Joyce, G.F. Self-Sustained Replication of an RNA Enzyme, *Science*, **323**, 1229-1232, 2009.
- Lindley, D., *Boltzmann's atom. The great debate that launched a revolution in physics*, New York: The Free Press, 2001.
- Lindley, D., *Incertidumbre. Einstein, Heisenberg, Bohr y la lucha por la esencia de la ciencia*, México: Ariel, 2008.
- Maia, P.F. & Justi, R., Learning of Chemical Equilibrium through Modelling-based Teaching, *International Journal of Science Education*, **31**(5), 603-630, 2009.
- Martin-Hansen, L., Defining inquiry. *The Science Teacher*, **69**(2), 34-37, 2002.
- Mencacci, C. & Cerveri, G., *Alzheimer Review*, 2008. Documento electrónico disponible en [http://www.leadershipmedica.com/sommari/2005/numero\\_10/medicina/articolo\\_1/articolo\\_ing/interfaccia.htm](http://www.leadershipmedica.com/sommari/2005/numero_10/medicina/articolo_1/articolo_ing/interfaccia.htm)
- Morin, E., *Los siete saberes necesarios para la educación del futuro*, México: UNESCO, 1999.
- Mortimer, E.F., Conceptual change or conceptual profile change?, *Science & Education*, **4**, 267-285, 1995.
- Murray, M.M., Krone, M.G., Bernstein, S.L., Baumketner, A., Condrón, M.M., Lazo, N.D., Teplow, D.B., Wyttenbach, T., Shea, J.E. & Bowers. M.T., Amyloid  $\beta$ -Protein: Experiment and Theory on the 21-30 Fragment, *Journal of Physical Chemistry B*, **113**(17), 6041-6046, 2009.
- Niaz, M., ¿Por qué los textos de Química General no cambian y siguen una 'retórica de conclusiones'?, *Educ. quím.*, **16**(3), 410-415, 2005.
- Nieswandt, M., Student Affect and Conceptual Understanding in Learning Chemistry, *Journal of Research in Science Teaching*, **44**(7), 908-937, 2007.
- NRC, *National Science Education Standards*, Washington, DC: National Research Council; National Academies Press, 1996.
- OCDE, *La definición y selección de competencias clave. Resumen ejecutivo*, Switzerland: Organization for Economic Cooperation and Development, 2005. La traducción al español puede obtenerse de la URL <http://www.deseco.admin.ch/>
- OCDE, *Programme for International Student Assessment, PISA 2006. Science competencies for tomorrow's world. Volume I:*

- Analysis*. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2007.
- Olivé, L., *La ciencia y la tecnología en la sociedad del conocimiento*, México: Fondo de Cultura Económica, 2007.
- Orgill, M.K. & Bodner, G., The Role of Analogies in Chemistry Teaching, en: T. Greenbowe, N. Pienta & M. Cooper (eds.) *Chemists' Guide to Effective Teaching* (pp. 90-105). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2005.
- Orgill, M.K. & Bodner, G., An Analysis of the Effectiveness of Analogy Use in College-Level Biochemistry Textbooks, *Journal of Research in Science Teaching*, **43**(10), 1040-1060, 2006.
- Padilla, K., Ponce-de-León, A., Rembado, M. & Garritz, A., Undergraduate Professors' Pedagogical Content Knowledge: The case of 'amount of substance', *International Journal of Science Education*, **30**(10), 1389-1404, 2008.
- Pandey, P., Datta, M. & Malhotra, B. D., Prospects of Nanomaterials in Biosensors, *Analytical Letters*, **41**, 159-209, 2008.
- Pintrich, P.R., Marx, R.W. & Boyle, R.A., Beyond cold conceptual change: the role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change, *Review of Educational Research*, **63**(2), 167-199, 1993.
- Powner, M.W., Gerland, B. & Sutherland, J.D., Synthesis of activated pyrimidine ribonucleotides in prebiotically plausible conditions, *Nature*, **459**, 239-242, 2009.
- Prigogine, Ilya, *The End of Certainty, Time, Chaos, and the New Laws of Nature*, New York: The Free Press, 1997.
- Prigogine, I., Enfrentándose con lo irracional (Ponencia presentada en 1985 en la casa de Dalí en Figueres, Cataluña), en: Wagenseberg, J. (ed.), *Proceso al azar*, Colección Metatemáticas, Barcelona: Edit. Tusquets, 1985.
- Raviolo, A. & Garritz, A., Analogies in the teaching of chemical equilibrium: a synthesis/analysis of the literature, *Chemistry Education: Research and Practice*, **10**(1), 5-13, 2009.
- Rocard, M., Csermely, P., Jorde, D., Lenzen, D., Wallberg-Henriksson, H. & Hemmo, V., *Science Education now: a Renewed Pedagogy for the Future of Europe*. Brussels: European Commission, Directorate-General for Research, 2007.
- Sametband, M.J., *Entre el orden y el caos. La complejidad*, Colección "La ciencia para todos" No. 167, México: Fondo de Cultura Económica, 1994.
- Sarantopoulos, P. & Tsaparlis, G., Analogies in chemistry teaching as a means of attainment of cognitive and affective objectives: a longitudinal study in a naturalistic setting, using analogies with a strong social content, *Chemistry Education: Research and Practice*, **5**, 33-50, 2004.
- Scerri, E.R., Philosophy of Chemistry—A New Interdisciplinary Field?, *Journal of Chemical Education*, **77**(4), 522-525, 2000.
- Schummer, J., Coping with the growth of Chemical Knowledge. Challenges for chemistry documentation, education and working chemist, *Educ. quím.*, **10**(2), 92-101, 1999.
- Schummer, J., Gestalt switch in molecular image perception: the aesthetic origin of molecular nanotechnology in supramolecular chemistry, *Foundations of Chemistry*, **8**(1), 53-72, 2006.
- Singh, R., Barman, A. & Prabhakar, R., Computational Insights into Aspartyl Protease Activity of Presenilin 1 (PS1) Generating Alzheimer Amyloid  $\beta$ -Peptides (A $\beta$ 40 and A $\beta$ 42), *Journal of Physical Chemistry B*, **113**(10), 2990-2999, 2009.
- Snyder, R., *Buckminster Fuller: An Autobiographical Monologue/Scenario*. New York: St. Martin's Press, 1980.
- Stokstad, E., Putting Chemicals on a Path to Better Risk Assessment, *Science*, **325**, 694-5, August 7th, 2009.
- Szostak, J.W. Bartel, D.P. & Luigi, P. Synthesizing life, *Nature*, **409**, 387-390, 2001.
- Treagust, D.F. & Chittleborough, G.D., Chemistry: A matter of understanding representations, en: J. Brophy (ed.), *Subject-specific instructional methods and activities* (Advances in research on teaching Vol. 8, pp. 239-267). Oxford: Elsevier Science Ltd, 2001.
- Urzúa, C. & Garritz, A., Evaluación de competencias en el nivel universitario, *Ideas@CONCYTEG*, **39**, 138-154, 2008. Revista del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del Edo. de Guanajuato. Puede consultarse en la URL <http://octi.guanajuato.gob.mx/gaceta/GacetaIdeas/frincipal.php>
- Vázquez-Alonso, A., Acevedo-Díaz, J.A. & Manassero-Mas, M.A., Consensos sobre la naturaleza de la ciencia: evidencias e implicaciones para su enseñanza, *Revista Iberoamericana de Educación*, De los lectores, 2004. Una versión electrónica del artículo puede obtenerse de la siguiente URL: <http://www.rieoei.org/deloslectores/702Vazquez.PDF>, consultada por última vez el 18 de octubre de 2009.
- Wilks, J., *The third law of thermodynamics*, Oxford University Press (Preface and pp. 113-115), 1961.
- Wisniak, J., Henri Moissan. The discoverer of fluorine, *Educ. quím.*, **13**(4) 267-274, 2002.