

plazar) sean capaces de regenerar tejidos. Este proceso se conoce como ingeniería tisular.

LA INVESTIGACIÓN EN ESPAÑA EN BIOMATERIALES

Actualmente en España existen grupos de gran prestigio, no sólo nacional sino internacional, que hacen investigación básica y aplicada en biomateriales. Creemos que en ningún caso tendrán inconveniente en atender a aquellos lectores que quieran saber más sobre los temas expuestos. En el campo de los metales y cementos óseos se puede citar a los Profesores Planell y Gil Mur, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Cataluña; en materiales cerámicos, a la Profesora Vallet Regí, del Dpto. de Bioinorgánica de la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense de Madrid, y a la Profesora León, del Dpto. de Física Aplicada de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad de Vigo; en polímeros, al Profesor

San Román, del Instituto de Química Orgánica del CSIC; en materiales biomiméticos, al Profesor Cabello, del Departamento de Física de la Materia Condensada de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid; y en materiales de origen biológico y biocompatibilidad, a los Profesores Olmo, Turnay y Lizarbe, del Dpto. de Bioquímica y Biología Molecular de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid. Todos ellos, contribuyen de forma activa al buen desarrollo de la ciencia de los biomateriales en España, como así ha quedado demostrado en el último congreso europeo sobre la materia celebrado en Barcelona el pasado mes de septiembre.

BIBLIOGRAFÍA

Las bases de datos que existen disponibles en Internet hacen posible que accedamos a numerosas publicaciones científicas. La conocida y popular dirección PubMed (www.ncbi.nlm.nih.gov) permitirá

acceder a temas específicos y a las últimas publicaciones de los temas seleccionados. En cuanto a libros generales y básicos sobre biomateriales y bioingeniería se pueden citar los siguientes:

- “Biomateriales: Aquí y Ahora”. Editorial Dykinson. M. Vallet Regí y L. Munera (Editores). Madrid (2000).
- “Fundamentos de Biomecánica y Biomateriales”. Editorial Ediciones Ergon. I. Proubasta; J. Gil Mur y J.A. Planell (Editores). Madrid (1997).
- “Biomaterials Science”. Editorial Academic Press. B.D. Ratner, A.S. Hoffman, F.J. Schoen & J.E. Lemons (Editores). Nueva York, USA (1996).
- “The Biomedical Engineering Handbook”. Editorial CRC Press. J.D. Bronzino (Editor). Boca Raton, Florida, USA (1995).

Eduardo Jorge Herrero
Servicio de Cirugía Experimental de la
Clínica Puerta de Hierro
y **Pilar Fernández Hernando**
Dpto. Ciencias Analíticas

COLABORACIONES

La inesperada efectividad de la investigación fuera de su campo específico^{1, 2}

- Ejemplos propios:
 - Reacciones de nitrógeno y oxígeno sobre SiC y el sistema de

protección térmica del trasbordador orbital espacial (*Space Shuttle*).

- Las placas del Estegosaurio y su papel en la transferencia de calor.
- Investigación sobre “carbón” en ausencia de carbón: deposición de vapor, deposición de partículas y deposición simultánea de partículas y vapores.
- Producción controlada y medidas de partículas valiosas pero invisibles (de “malas” partículas a “buenas” partículas).

- Ejemplos de la investigación de otros dos colegas:
 - Desarrollo de la técnica de Cromatografía Líquida –Electrospray– Espectrometría de Masas para bioquímica analítica.
- Conclusiones y “Lecciones” que deben aprenderse.

INTRODUCCIÓN

La ocasión de este gran honor y ceremonia me proporcionan una buena oportunidad para reflexionar sobre mis experiencias en investigación y sobre algunas de las conclusiones que he obtenido de ellas. Aunque cada uno de nosotros constituye un elemento único e irrepetible, quizás

¹ Discurso pronunciado por el autor en el acto de investidura como Doctor *Honoris Causa* en Ciencias por la Universidad Nacional de Educación a Distancia (Madrid, 28 de noviembre de 2002), inspirado, en su formato, en el ensayo de E. Wigner (1959): “The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences”; capítulo 17 de “*Symmetry and Reflections-Scientific Essays*”: Indiana University Press (1967).

² Traducido de la versión original en inglés por Ana Villuendas de Sambricio y José Luis Castillo.

algunas de estas observaciones y ejemplos puedan ser útiles a las próximas generaciones de académicos, muchos de los cuales tendrán, inevitablemente, alguna dificultad inicial para “encontrar el camino” y comenzarán su carrera sin tener un alto grado de confianza en sí mismos. Algunos de estos ejemplos contienen también implicaciones para quienes se dedican a la guía y/o al apoyo financiero de la investigación de otros, como se menciona explícitamente en la sección tercera de este trabajo. Evidentemente, los detalles específicos de mis ejemplos concretos no es de esperar que sean directamente transferibles, pero ciertas “lecciones” pueden ser de aplicación más general, incluso fuera del dominio de la investigación en ciencia e ingeniería (a la que explícitamente me restringiré).

Un tema presente a lo largo de toda mi propia experiencia personal y que de hecho ha motivado mi elección del título, es que un ataque “frontal” –o a la “fuerza bruta”– a un problema aplicado de envergadura, raramente es la táctica que conduce a una solución “económica” del problema. Más bien, suele haber caminos de “menor resistencia” (sí, ¡incluso caminos “tortuosos”!) que proporcionan la idea necesaria para obtener resultados y continuar siguiendo nuevas direc-

ciones, a menudo imprevistas, pero en cualquier caso fructíferas.

Un segundo tema permanente es que *la amplitud de miras* en educación e investigación puede ser bastante fructífera. En efecto, parece que estar completamente sumergido en la tradición de una sola disciplina en particular, prácticamente ¡te “condena” a limitarte a pequeños progresos bastante poco imaginativos! Si mis ejemplos (en la siguiente sección) parecen indicar algo, es que cada uno de nosotros puede explotar sus grandes conocimientos (en cierto modo no planificados pero invariablemente únicos) incluso en esta era de cada vez mayores (pero no tan efectivos) centros de I+D, y “equipos” de investigación interdisciplinarios. Ejemplos del éxito de los “intrusos” abundan en la historia de la ciencia y de la tecnología. A continuación, intentaré ampliar esta ya larga lista, aunque en el contexto de retos científicos o tecnológicos más modestos.

EJEMPLOS DE ÉXITOS INESPERADOS

De un sencillo filamento al trasbordador espacial

Mi primer ejemplo versa sobre un caso destacado, en el que una serie

de experimentos de mesa de laboratorio y bajo coste, sobre sencillos filamentos, de diámetro submilimétrico, calentados eléctricamente (¡condiciones claramente alejadas de las complejidades de la re-entrada hipersónica de un gran vehículo espacial tripulado en la atmósfera terrestre!) proporcionan la información necesaria para diseñar el llamado “sistema de protección térmica” del trasbordador orbital espacial de la NASA (conocido como *Space Shuttle*).

Si se intentan reproducir con exactitud todas las condiciones “aero-termodinámicas” encontradas por este vehículo tripulado de re-entrada, se deberían construir unas instalaciones de prueba bastante grandes y muy costosas. Sin embargo, a principio de la década de 1960, el autor concluyó que si mediante una descarga de microondas se pudieran producir las especies químicas correctas en un reactor experimental de flujo de gas (esquemáticamente representado en la Figura 1a), estas especies (en este caso oxígeno y nitrógeno atómicos) podrían ser dirigidas contra materiales refractarios (por ejemplo, carburo de silicio) calentados eléctricamente, de interés futuro para cohetes y para el programa espacial. Estas mediciones

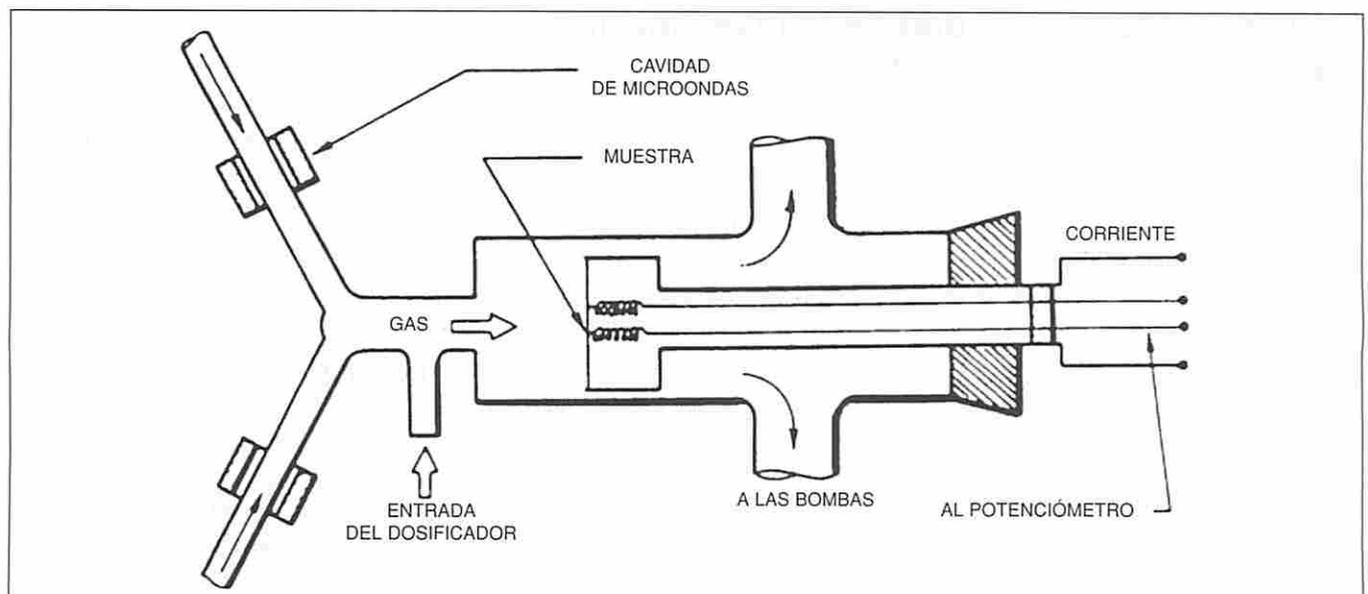


Figura 1a. Reactor de flujo (esquemático) para el estudio del ataque al material sólido refractante de carburo de silicio (SiC en forma de filamento) por mezclas gaseosas de oxígeno atómico y nitrógeno atómico [reproducida a partir de Rosner y Allendorf (1970a)].

podrían estar relacionadas con la probabilidad de que estas colisiones, entre el gas y el sólido, fueran capaces de “gasificar” el material (Rosner y Allendorf, 1970a, b), y permitirían a los ingenieros que trabajaban en la industria, bajo contrato con la NASA, calcular cuántas “re-entradas” podrían ser soportadas por los materiales escogidos finalmente para recubrir el borde de ataque y la cubierta de la nariz frontal del trasbordador *Space Shuttle* (Figura 1b).

La aproximación de un ingeniero para descubrir la funcionalidad de las placas de los dinosaurios

Con anterioridad al año académico 1974-75, se admitía en la paleontología convencional que las enormes placas que se alineaban en el lomo de dinosaurios como el estegosaurio (véase la Figura 2, dibujada por el autor para la portada de la revista *Science*) eran, en cierto modo, unas estructuras útiles para el combate de los dinosaurios con sus depredadores. En aquel entonces, un estudiante de doctorado en paleontología (James O. Farlow) se presentó en mi oficina, preguntándose si existía alguna manera de demostrar su audaz hipótesis alternativa; a saber, que estas estructuras cumplían realmente una función de disipación del calor corporal. Las implicaciones de esta hipótesis rival, de ser cierta, incluían un nivel metabólico muy superior al que se esperaba para estas criaturas prehistóricas que se suponían previamente de “sangre fría”.

¿Cómo puede un ingeniero químico/mecánico/aeronáutico, sin formación en paleontología y sin un proyecto para financiar un estudio “adecuado”, arrojar alguna luz sobre una cuestión fisiológica tan insólita? Tras una reflexión, decidimos que quizás una combinación de observaciones de las placas de estegosaurios, conservadas en el Museo Peabody de Yale, junto con cálculos de ingeniería sobre transferencia de

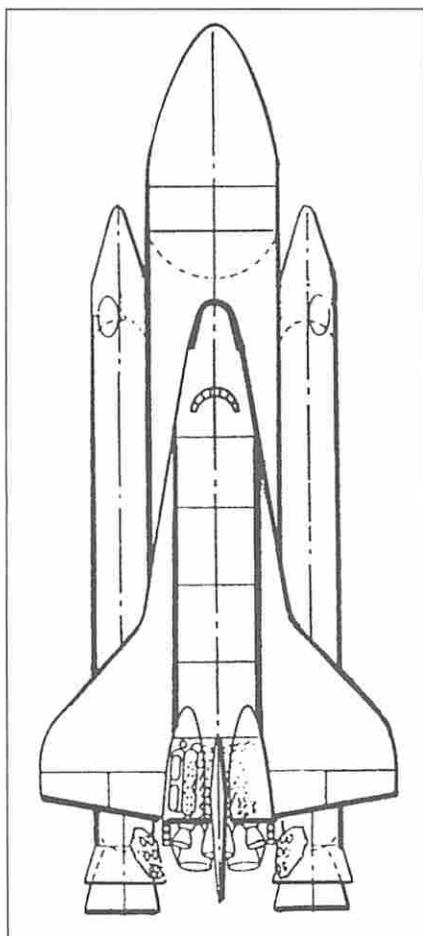


Figura 1b. Trasbordador orbital espacial (*space shuttle*) de la NASA (vehículo de reentrada) en posición de lanzamiento, con los cohetes propulsores y el tanque externo de propelente incorporados. Un recubrimiento de SiC (véase la Figura 1a y la Sección 2.1) protege la nariz y los bordes de ataque del aire caliente y disociado, en el momento de la reentrada en la atmósfera terrestre.

calor (“de aletas”) y; a la vez, experimentos de laboratorio sobre transferencia de calor por convección, utilizando un *modelo* del estegosaurio (convenientemente simplificado y realizado, a pequeña escala, en aluminio) montado en un pequeño túnel de viento, ¿podrían arrojar suficiente luz como para resolver esta pregunta! Efectivamente, las placas de los especímenes del museo revelaban las dimensiones típicas y la evidencia de orificios para vasos sanguíneos, y nuestros cálculos de “ingeniería” (de transferencia de calor por paneles o aletas), así como los experimentos en el túnel de viento con un “modelo calorímetro” ultra-simplificado en aluminio, revelaron un significativo

y controlable aumento relativo en la disipación de calor, para todas las orientaciones del viento. Este descubrimiento de la función termoreguladora de las placas del estegosaurio, que fue publicado en la revista *Science* (Farlow y otros, 1976), causó un impacto sorprendente en el mundo de la paleontología, al igual que sobre el público en general (cuyo apetito de información sobre estas extintas criaturas parece insaciable). He dejado las implicaciones más generales de este trabajo a mi joven coautor (actualmente Profesor de Paleontología) pero a mi entender, nuestros principales resultados han soportado el paso del tiempo y esta breve e inusual “excursión fuera de la corriente principal” incluso ¡me ganó temporalmente un puesto en el “Quién es quién en Paleontología”!

Investigación en carbón ¿sin carbón!

Las cámaras de combustión de carbón pulverizado para generación de energía deben afrontar los grandes problemas asociados con el contenido inorgánico de todos los carbones. Este contenido inorgánico conduce inevitablemente a la formación y deposición de “cenizas volantes” y, aguas abajo en la corriente, a posibles problemas de emisiones que deben ser resueltos para asegurar la operación de las centrales, a largo plazo, en la proximidad de centros urbanos. ¿Cuáles serán las leyes de deposición de partículas sobre, por ejemplo, las superficies de los intercambiadores de calor expuestos a semejantes corrientes cargadas de partículas que son producto de la combustión? Estas leyes que dependen del espectro de tamaños de las partículas producidas ¿deben estudiarse quemando carbón realmente? Tal vez sería más ventajoso producir las partículas del tamaño adecuado por otros medios y en ambiente de combustión que fuera mucho más fácil de controlar y caracterizar. Al principio de la década de 1980, esta

estrategia fue desarrollada en nuestro laboratorio por el simple método de pulverizar soluciones acuosas de sales de Mg en un quemador plano de premezcla laminar (Figura 3), y haciendo incidir la corriente resultante con partículas de MgO sobre láminas de platino que podían calentarse eléctricamente a diferentes temperaturas (siempre inferiores a la temperatura de los gases quemados). Puesto que la reflectividad de la lámina dependería de la porción cubierta por partículas, la pendiente en la disminución de la reflectividad podría utilizarse para obtener rápidamente el ritmo de deposición de las partículas. Estos experimentos se podían repetir para diferentes temperaturas de las cintas y de la llama. De esta forma, fuimos capaces de establecer con precisión las leyes que gobiernan el ritmo de deposición de partículas submicrónicas suspendidas sobre superficies “frías” (Rosner y Kim,

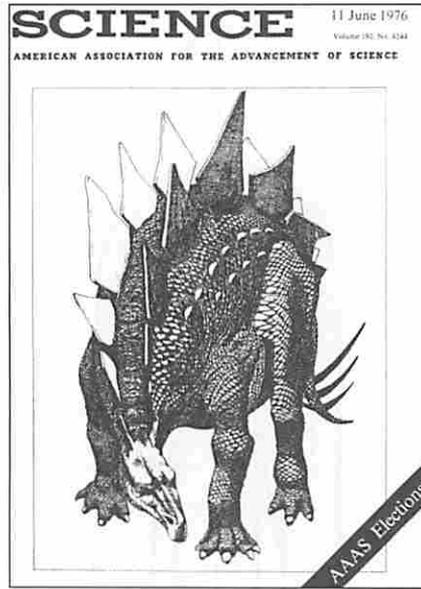


Figura 2. Portada de la revista Science, del 11 de junio de 1976, mostrando el grabado (reconstrucción) del autor del dinosaurio Estegosaurio. El dibujo acompañaba al artículo técnico (en las páginas 1123 a 1125) que presentaba la evidencia de “ingeniería” (incluyendo experimentos con un “modelo”, en un túnel de viento) de que la doble fila de placas eran realmente “aletas” para disipación de calor.

1984), proporcionando las bases para el desarrollo de teorías predictivas y de correlaciones para ingeniería (Gokoglu y Rosner, 1984) (anteriormente sólo disponibles para difusión ordinaria (Browniana) y no para situaciones dominadas por “termofóresis de partículas”). Además, estas nuevas leyes se utilizan no sólo en la industria de plantas de producción de energía para predecir el ensuciamiento de los intercambiadores de calor, sino que también se utilizan para optimizar la producción de fibra óptica (Park y Rosner, 1988), para la industria de telecomunicaciones. En ampliaciones de estos experimentos fuimos capaces de establecer las leyes que gobiernan la deposición de vapores condensables (Liang y Rosner, 1987; Castillo y Rosner, 1989a, b) y la importante interacción entre deposición de partículas y deposición de vapores (Castillo y Rosner, 1988).

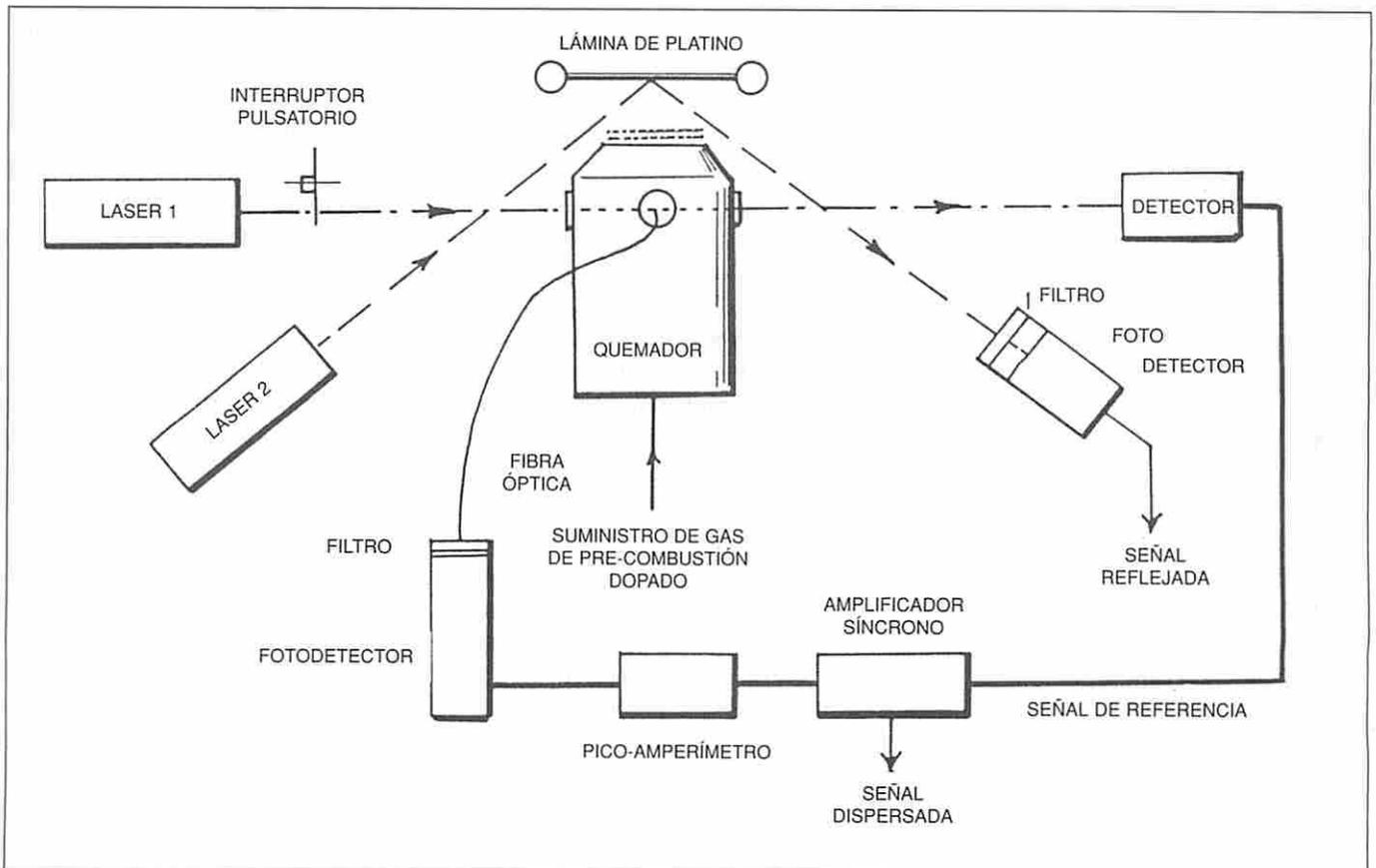


Figura 3. Técnica de la reflectividad de láminas para estudios experimentales en tiempo real de la deposición inducida por termofóresis de partículas submicrónicas de MgO(s), a partir de una corriente laminar de productos gaseosos de combustión [reproducida a partir de Rosner y Kim (1984)].

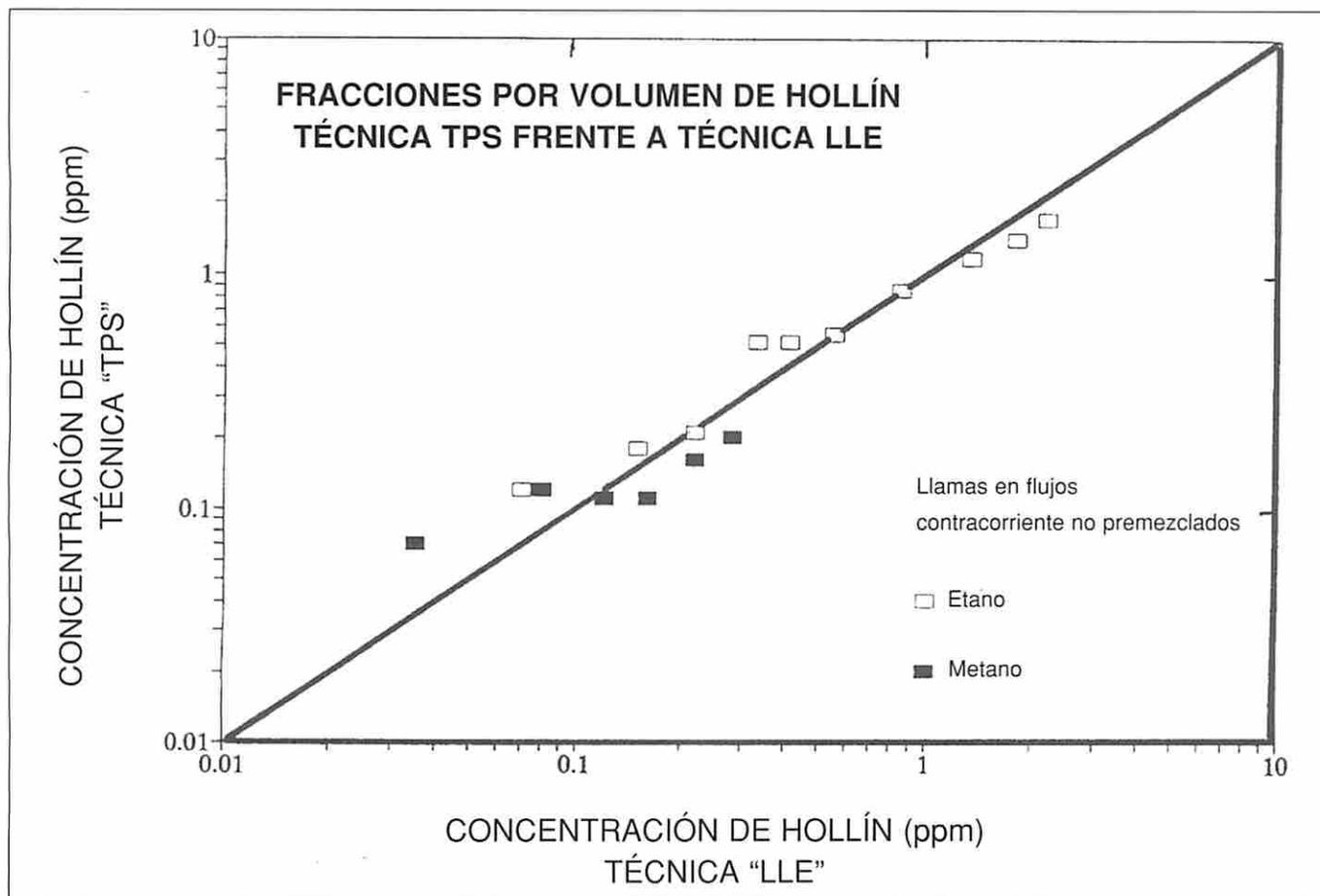


Figura 4. Comparación de las concentraciones locales de hollín (fracciones por volumen en partes por millón, ppm) medidas por dos técnicas independientes: por la "respuesta del termopar" (marcada como "TPS"), y por extinción de luz láser (marcada como "LLE") [reproducida a partir de McEnally y otros (1997)].

Muestreo no selectivo de partículas "invisibles"

En investigación, cada nuevo descubrimiento tiene habitualmente importantes implicaciones. Si la captura de partículas submicrónicas de aerosoles por un receptor frío está dominada por termofóresis y se puede demostrar que el ritmo con que se depositan las partículas es independiente del tamaño y morfología de las partículas, entonces puede explotarse un fenómeno de laboratorio que era previamente "sufrido como una desgracia". Me refiero a la "deriva" (debida a la captura de polvo) de la lectura de un termopar, cuando se introduce en un flujo caliente de gas polvoriento. Una vez entendida esta "deriva", como el resultado de la deposición del polvo en el termopar por el mecanismo de termofóresis, la evolución temporal de la temperatura medida

puede transformarse matemáticamente en una línea recta, cuya pendiente proporciona la concentración local de partículas ("fracción de volumen de hollín"), ¡sin necesidad de ninguna hipótesis sobre la distribución de tamaños, ni sobre la morfología o las propiedades ópticas de las partículas (Eisner y Rosner, 1985, McEnally y otros, 1997)! (Véase Figura 4.) Esta sencilla técnica experimental se usa ahora ampliamente, siendo incluso sensible a partículas suspendidas que no absorben la radiación visible —como ocurre con el hollín "recién formado", de tamaño nanométrico, en las llamas ricas de hidrocarburo en aire (McEnally y otros, 1997; Koylu y otros, 1997, Basile y otros, 2002).

Nuestro análisis de la respuesta del termopar originó también la ahora llamada técnica de "muestreo termoforético" (conocida como TPS, por sus siglas en inglés) (Dobbins y

Megaridis, 1987; Koylu y otros, 1997, Xing y otros, 1996). En este caso, el receptor frío, insertado sólo un corto intervalo de tiempo en el ambiente de la llama, contiene un soporte de los utilizados en un microscopio electrónico (EM-) y que puede ser posteriormente examinado con una magnificación de 10.000 aumentos, haciendo visibles las partículas con diámetros superiores a los 10 nanómetros. El hecho de que el muestreo termoforético sea realmente insensitivo al tamaño y morfología de las partículas, fue convincentemente demostrado teóricamente en tres artículos de nuestro grupo de investigación (Rosner y García-Ybarra, 1989; Mackowski, 1990 y Rosner y otros, 1991) y apoyado por los experimentos de Gómez y Rosner (1993). El muestreo termoforético se utiliza actualmente en todo el mundo, especialmente para determinar sin ambigüedad los tamaños de

esférulas y agregados y la morfología de partículas, (véase, por ejemplo, el trabajo de Stark, 2002). Lo que hace a esta técnica tan potente (y casi indispensable) es que, a diferencia de todos los demás mecanismos de deposición [por ejemplo: la difusión Browniana (Tandon y Rosner, 1995), o la inercia de las partículas (de la Mora y Rosner, 1982; Park and Rosner, 1989, Rosner y otros, 1995)], únicamente el muestreo termofóretico es “imparcial” con respecto al tamaño, la morfología y las propiedades ópticas de las partículas.

Convección natural ¿en ausencia de gravedad!

El sistema del trasbordador espacial mencionado anteriormente, operacional desde ya hace unos 20 años, ha proporcionado el acceso a condiciones de gravedad reducida y larga duración, para muchos estudios fundamentales en Física, Química y Biología, e incluso para Ciencia de Materiales (por ejemplo, en crecimiento de cristales). La mayoría de los científicos e ingenieros, involucrados en el diseño de tales experimentos de crecimiento de cristales, esperaban eliminar la convección

yendo a condiciones de gravedad “casi nula”. Esta ausencia de convección simplificaría en gran medida el análisis de, digamos, experimentos sobre transporte físico de vapores en los que un material de interés se sublima en el extremo caliente de un pequeño recipiente, mientras que en el otro extremo del mismo recipiente, crece formando capas cristalinas (una “ampolla”).

Pero, si las partículas sólidas suspendidas en un gas pueden “nadar” en dirección contraria al gradiente de temperatura existente, ¿por qué no podrían igualmente, las paredes sólidas no isotermas de la ampolla en el crecimiento del cristal “bombear” una corriente en el gas, incluso en ausencia de gravedad? Esta predicción (Rosner, 1989; Rosner y Papadopoulos, 1996; véase la Figura 5) cogió “por sorpresa” a muchos en las comunidades de mecánica de fluidos continuos, y de crecimiento cristalino, y motivó un aluvión de investigaciones internacionalmente (que continua hoy día). Efectivamente, la “microgravedad” puede ser el ambiente más atractivo para estudiar la condición de “deslizamiento térmico” que se aplica a un fluido viscoso en contacto con una pared sólida no isotérmica. Una

forma especialmente simple de abordarlo sería estudiar y analizar con varias esferas de pequeña inercia, recubiertas de materiales de baja conductividad térmica, el arrastre “foto-forético” que las aleja de una misma fuente luminosa de alta intensidad, efecto que el autor ha llamado: un experimento de “carretera espacial”. Es una pena, pero, a fecha de hoy, aún no han sido proporcionados los recursos necesarios por la NASA, para llevar a cabo esta idea.

Amplificación del poder analítico de los cromatógrafos y espectrómetros de masas: El “Electrospray” como adaptador

Mi último ejemplo proviene del trabajo de dos de mis, durante mucho tiempo, colegas del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Yale. Durante los últimos 30 años, en este Departamento de Yale han existido dos grandes líneas de investigación, ¡incluso más alejadas de la línea central que la mía propia! Una era del Profesor Csaba Horvath; una evolución de la técnica denominada

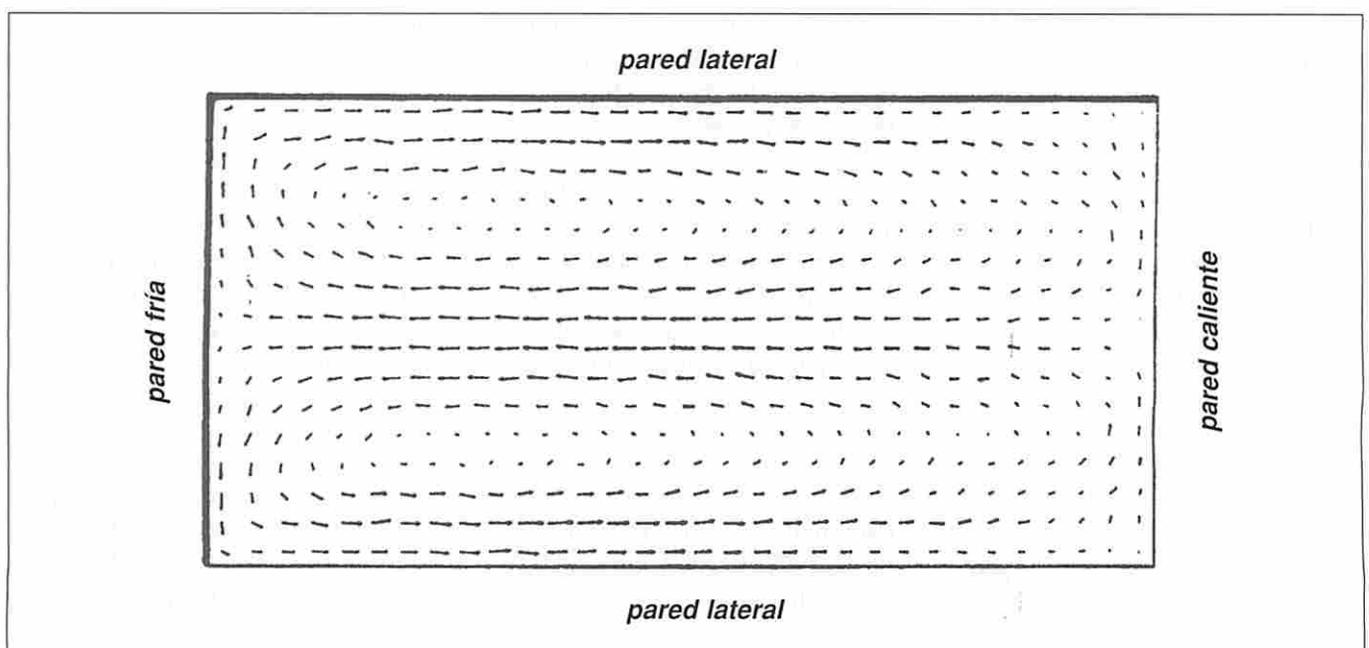


Figura 5. Predicción de las corrientes en el gas (“promovidas” por las paredes sólidas no isotérmicas) dentro de un recipiente rectangular, en ausencia de gravedad [reproducida a partir de Rosner y Papadopoulos (1996)].

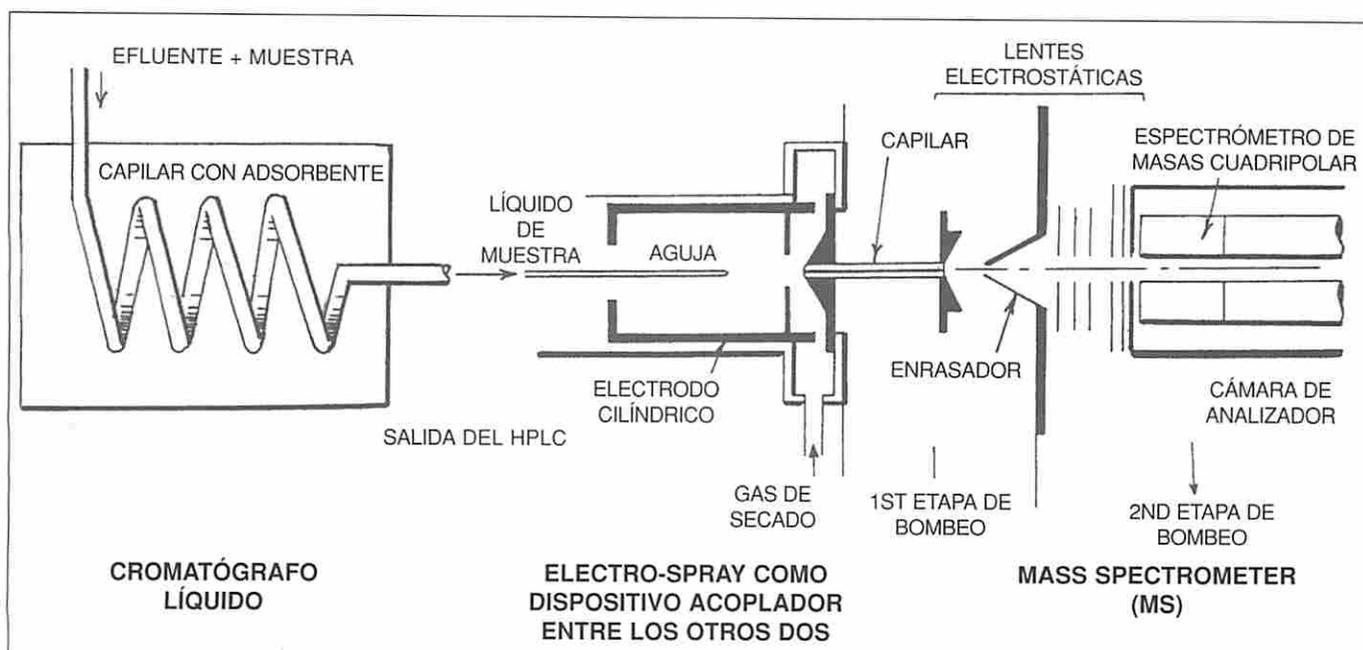


Figura 6. Instrumento "en serie", cromatógrafo líquido, electro-spray y espectrómetro de masas ("LC-ES-MS") (esquemático) desarrollado como resultado de la investigación de los Profesores C. Horvath y J.B. Fenn en el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Yale.

Cromatografía Líquida de Alto Rendimiento (abreviada por las siglas HPLC, en inglés). Esta evolución, usada intensivamente para separaciones bioquímicas, está ampliamente acreditada y Horvath aparece, por derecho propio, listado entre los 200 químicos aplicados más notables del recientemente pasado siglo. La segunda, y aparentemente independiente, línea de investigación era el desarrollo y aplicación del análisis mediante Espectrometría de Masas (MS-) de *haces moleculares* de alta intensidad del Profesor John Fenn. Parece una ironía que entre 1984 y 1994, intervalo en el que celebró su 70 cumpleaños, Fenn obtuvo [usando una técnica denominada de inyección líquida por "electro-spray" (ES-), Fenn y otros, 1990] una forma de introducir proteínas y otras macromoléculas de carga múltiple, en un espectrómetro de masas para análisis de carga/masa. Digo que una *ironía*, porque la combinación "en serie" de LC-ES-MS (véase la Figura 6) constituye ahora para la comunidad bioquímica, farmacéutica y de ingeniería, quizás la herramienta analítica disponible más potente, ¡una herramienta mucho más potente que HPLC o MS por sí

mismas! Por este último descubrimiento, "el electro-spray como adaptador", John Fenn (ahora con 85 años de edad) ha sido uno de los galardonados con el Premio Nobel en Química en el año 2002.

ALGUNAS LECCIONES Y CONCLUSIONES

He seleccionado unos cuantos ejemplos representativos de mi propio "viaje" por la investigación, presentándolos aproximadamente en orden cronológico. Tengo mis dudas sobre si con ello puede apreciarse en detalle una cierta "trayectoria profesional", y es prácticamente imposible para mí, cuantificar las numerosas influencias que han contribuido a mi propia carrera. El papel de personas modélicas ha tenido un impacto determinante, incluyendo el de aquellos colegas a quienes "he conocido" sólo por leer sus trabajos y biografías. A esta categoría pertenecen químicos, físicos, ingenieros y matemáticos cuyo legado escrito se conserva, afortunadamente, para las futuras generaciones de investigadores. Me sentí indudablemente atraído hacia el

ambiente universitario de investigación, donde he sido suficientemente afortunado como para ser capaz de crear un grupo interdisciplinario de investigación [en el área genérica de Ingeniería de Reacciones Químicas a Alta Temperatura, *High Temperature Chemical Reaction Engineering* (HTCRE)] con una orientación hacia la "combustión" (Rosner, 1997); así como por atraer y trabajar con un grupo internacional de estudiantes de doctorado e investigadores post-doctorales de talento, españoles muchos de ellos. De hecho, en la siguiente sección se cita sólo una pequeña parte de nuestro "output" (nuestros productos), y mi esperanza es que estas ideas, técnicas y resultados continúen sirviendo como "inputs" (valores iniciales) para quienes nos sucedan —con nuevos resultados sorprendentes y valiosos. También, me entusiasma la cada vez mayor facilidad de continuar colaborando con antiguos estudiantes, a pesar de las grandes distancias geográficas tras su graduación. Afortunadamente, hoy lo que cuenta es la distancia medida en años luz!

La investigación requiere también un ambiente razonablemente

estable y unos recursos económicos. He sido afortunado de "llegar a la corriente" en un momento, para los Estados Unidos de América, en que la financiación de proyectos para investigadores "principales" individuales: a) era generosa; b) no estaba concentrada en una única agencia; c) estaba basada en un sistema de revisión "por pares", razonablemente objetivo, y; d) no estaba asociada con la necesidad de continuos y exhaustivos "informes". En mi experiencia, las ideas y técnicas novedosas se originan, en la mayoría de los casos, en una única mente, o como resultado de la interacción intensa entre un par de investigadores, preferentemente con distinta formación. Por eso, no sorprende que encuentre bastante preocupante la tendencia actual de financiar grandes "centros" (normalmente a expensas de las ayudas a la investigación para investigadores individuales) —y dudo que sea económicamente efectiva, a pesar de los resultados reivindicados como espectaculares y de la reducción en los costes "administrativos" de las agencias que se proclaman.

Para terminar, deseo agradecer al profesorado y a la administración de la UNED este gran honor que me ha concedido, ¡tan tempranamente! en mi carrera de investigación (a la vista del maravilloso ejemplo de John B. Fenn mencionado con anterioridad). Espero que estos ejemplos personales y los comentarios sirvan de ayuda, especialmente a aquellos de vosotros que se embarquen en una carrera orientada hacia la actividad docente, académica orientada hacia la investigación en una universidad de categoría mundial.

Agradecimientos

Es un placer agradecer a mis anteriores y actuales colaboradores y coautores, cuyos trabajos se citan en la siguiente sección y en mi libro de texto (Rosner, 2000), así como a todas las agencias que han patrocinado la mayor parte de la investiga-

ción brevemente discutida aquí. Entre estas agencias se encuentran: US-AFOSR, NASA, DOE y NSF, además de las ayudas de las industrias afiliadas a mi laboratorio HTCRC en Yale, entre las que se incluyen Dupont, Babcock and Wilcox, ALCOA, SCM-Chemicals, GE y United Technologies.

REFERENCIAS CITADAS

- Basile, G.; Rolanda, A.; D'Alessio, A.; D'Anna, A. & Minutolo, P.: "Coagulation and Carbonization Processes in Slightly Sooting Pre-mixed Flames", en *Proc. 29th International Symposium on Combustion*, The Combustion Inst., Pittsburgh PA (en prensa; Paper 5B10).
- Castillo, J.L. & Rosner, D.E.: "Theory of Surface Deposition from a Unary Dilute Vapor-Containing Stream, Allowing for Condensation Within the Laminar Boundary Layer", *Chem. Eng. Sci.* **44** (4) 925-937 (1989a).
- Castillo, J.L. & Rosner, D.E.: "Equilibrium Theory of Surface Deposition from Particle-Laden Dilute, Saturated Vapor-Containing Laminar Boundary Layer", *Chem. Eng. Sci.* **44** (4) 939-956 (1989b).
- Castillo, J.L. & Rosner, D.E.: "Non-equilibrium Theory of Surface Deposition from Particle-Laden, Dilute Condensable-Vapor Containing Stream, Allowing for Particle Thermophoresis and Vapor Scavenging Within the Laminar Boundary Layer", *Int. J. Multiphase Flow* **14** (1) 99-120 (1988).
- Dobbins, R.A. & Megaridis, C.: "Morphology of Flame-Generated Soot as Determined by Thermophoretic Sampling", *Langmuir* (ACS) **3**, 254-259 (1987).
- Eisner, A.D. & Rosner, D.E.: "Experimental Studies of Soot Particle Thermophoresis in Non-isothermal Combustion Gases Using Thermocouple Response Techniques", *Combustion & Flame*, **61**, 153-166 (1985).
- Farlow, J.O.; Thompson, C.V. & Rosner, D.E.: "Plates of the Dinosaur Stegosaurus: Forced Convection Heat Loss Fins?", *Science*, **192** (4244), 1123-1126, (número del 11 de junio de 1976).
- Fenn, J.B.; Mann, M.; Meng, K. & Wong, S.F.: "Electro-spray Ionization—Principles and Practice", *Mass Spectrometry Reviews* **9**, 37-70 (1990).
- Fernández de la Mora, J. & Rosner, D.E.: "Inertial Deposition of Particles Revisited and Extended: Eulerian Approach to a Traditionally Lagrangian Problem", *J. Physicochemical Hydrodynamics* (PCH) **2**, 1-21 (1981); véase también: *J. Fluid Mechs.* **125**, 379-395 (1982).
- García-Ybarra, P.L. & Rosner, D.E.: "Thermophoretic Properties of Non-spherical Particles and Large Molecules", *AIChE J.* **35** (1) 139-147 (1989).
- Gokoglu, S.A. & Rosner, D.E.: "Correlation of Thermophoretically-Modified Small Particle Diffusional Deposition Rates in Forced Convection Systems With Variable Properties, Transpiration Cooling and/or Viscous Dissipation", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **27**, 639-645 (1984).
- Gómez, A. & Rosner, D.E.: "Thermophoretic Effects on Particles in Counterflow Laminar Diffusion Flames", *Comb. Sci. Tech.* **89**, 335-362 (1993).
- Koylu, U.O.; McEnally, C. S.; Rosner, D.E. & Pfefferle, L.D.: "Simultaneous Measurements of Soot Volume Fraction and Particle Size/Microstructure in Flames Using a Thermophoretic Sampling Technique", *Combustion & Flame*, **110**, 494-507 (1997).
- Liang, B. & Rosner, D.E.: "Laboratory Studies of Binary Salt CVD in Combustion Gas Environments" *AIChE J.* **33** (12) 1937-1948 (1987); véase también: *Chem. Eng. Commun.* **42**, 171-196 (1986).
- Mackowski, D. W.: "Phoretic Behavior of Asymmetric Particles in Thermal Non-equilibrium With the Gas: Two-Sphere Aggregates", *J. Colloid and Interface Sci.* **140** (1), 138-157 (1990).
- McEnally, C.S.; Koylu, U.O.; Pfefferle, L. D. and Rosner, D.E.: "Soot Volume Fraction and Temperature Measurements in Laminar Non-Pre-mixed Flames Using Thermocouples", *Combustion & Flame*, **109**, 701-720 (1997).
- Park, H.M. & Rosner, D.E.: "Combined Inertial and Thermophoretic Effects on Particle Deposition Rates in Highly Loaded Dusty Gas Systems", *Chemical Engineering Science* **44** (10) 2233-2244 (1989).
- Rosner, D.E.: *Transport Processes in Chemically Reacting Flow Systems*, Dover Publications, NY (2000).
- Rosner, D.E.: "Combustion Synthesis and Materials Processing", *Chemical Engineering Educ* (ASEE), **31**, 228-235, Fall (1997).
- Rosner, D.E. & Papadopoulos, D.: "Jump, Slip and Creep Boundary Conditions at Non-equilibrium Gas/Solid Interfaces", *Industrial/Engineering Chemistry-Research* (ACS), **35** (9) 3210-3222 (1996).
- Rosner, D.E.; Tandon, P. & Konstandopoulos, A.G.: "Local Size Distributions of Particles Deposited by Inertial Impaction on a Cylindrical Target in Dust-Laden Streams", *J. Aerosol Sci.* **26** (8) 1257 (1995).
- Rosner, D.E.; Mackowski, D.W.; Tassopoulos, M.; Castillo, J.L. & García-Ybarra, P.L.: "Effects of Heat Transfer on the Dynamics and Transport of Small Particles Suspended in Gases", *Industrial/Engineering Research* (ACS) **31**, 760-769 (1992).
- Rosner, D.E.; Mackowski, D.W. & García-Ybarra, P.L.: "Size- and Structure Insensitivity of the Thermophoretic Transport of "Aggregated" Soot Particles in Gases", *Combustion Science and Technology* **80** (1-3) 87-101 (1991).

- Rosner, D.E.: "Side-wall Gas "Creep" and "Thermal Stress Convection" in Microgravity Experiments on Film Growth by Vapor Transport", *Phys. Fluids A - Fluid Mechanics* **1** (11), 1761-1763 (1989).
- Rosner, D.E. & Park, H.M.: "Thermophoretically Augmented Mass, Momentum- and Energy Transfer Rates in High Particle Mass-Loaded Laminar Forced Convection Systems", *Chemical Engineering Sci.* **43**, (10) 2689-2704 (1988).
- Rosner, D.E. & Kim, S.S.: "Optical Experiments on Thermophoretically Augmented Submicron Particle Deposition from "Dusty" High Temperature Gas Flows", *Chemical Engineering J* (Elsevier) **29** (3) 147-157 (1984).
- Rosner, D.E. & Allendorf, H.D.: "High Temperature Kinetics of the Oxidation and Nitridation of Pyrolytic Silicon Carbide in Dissociated Gases", *J. Phys. Chem.* **74**, 1829-1839 (1970a).
- Rosner, D.E. & Allendorf, H.D.: "Nitrogen as an Ablative Reactant in Dissociated Air Kinetics of the Attack of Silicon Carbide by Atomic Nitrogen/Atomic Oxygen Mixtures Above 1800K", *AIAA J.* **8**, 166-168 (1970b).
- Stark, W.J.: Tesis Doctoral, PhD Dissertation on *Flame Synthesis of Pigment and Catalyst Particles*, ETH-Zurich, Switzerland, Inst. Process Engineering (2002).
- Tandon & Rosner, D.E.: "Translational Brownian Diffusion Coefficient of Large (Multi-particle) Suspended Aggregates", *Industrial/Engineering Chemistry (ACS)* **34** (10) 3625-3277 (1995).
- Wigner, E.: "On the Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences", Ch.17 in *Symmetry and Reflections-Scientific Essays*, Indiana Univ. Press 1967).
- Xing, Y.; Koylu, U.O. & Rosner, D.E.: "Synthesis and Restructuring of Inorganic Nano-particles in Counterflow Diffusion Flames", *Combustion and Flame* **107**, 85-102 (1996); See, also: *AICHE J.* **43** (11A) 2641-2649 (1997) y *AICHE J.* **48** (3) 476-491 (2002).

Daniel E. Rosner
Dpto. de Ingeniería Química
Universidad de Yale

El número de oro

A través de los tiempos los pueblos han aspirado a rodearse de cosas bellas. Pero ¿qué es la belleza? Los griegos fundaron la Estética como un medio de analizar la belleza, y suponían que en la base de ésta estaba la Armonía. Según los griegos Belleza y Verdad estaban estrechamente relacionadas y el artista busca la Verdad mediante la Belleza y el científico busca la Belleza mediante la Verdad.

Si encontrásemos un método para medir y comparar la belleza de una escultura, un nocturno, un templo, o un progreso de la ciencia, seríamos capaces de cuantificar qué es más bello y qué lo es menos. La búsqueda de esta piedra filosofal ha llevado a muchos creadores a seguir unas reglas y en otros casos a romperlas. Los siglos XIX y XX han sido muchas veces testigos de cánones nuevos y no obstante sigue habiendo una belleza soterrada que es difícil de encasillar en fórmulas y un concepto de armonía al que no podemos sustraernos cuando oímos una fuga de Bach, admiramos la Mona Lisa de Leonardo o vemos un templo griego.

En Ciencia se ha asociado la Belleza con la Simplicidad, que quizás sea la forma suprema de la Armonía, formulaciones como las leyes de Newton, de Kepler, o la conocida

$$E = m c^2$$

han sido celebradas por explicar de una forma sencilla hechos inicialmente complicados pero que, gracias a inteligencias preclaras, se simplificaron y se hicieron transparentes. Los bellos estudios de Newton sobre la composición de la luz, la explicación de Einstein sobre el extraño movimiento browniano o el fenómeno fotoeléctrico, las leyes de Maxwell o el Teorema de Gödel sobre la incompletitud de la Lógica, sobrecogen a los científicos y admiran a los profanos que leen libros de

divulgación científica como "La nueva mente del emperador" o "La historia del tiempo".

El arquitecto Leone Batista Alberti dice a propósito de la belleza: "*Hay algo más grande, compuesto de una combinación y una conexión de tres cosas (número, limitación y orden), algo que saca a la luz la cara de la belleza. Y lo llamamos Armonía, y que es, sin duda, la fuente del encanto y de la belleza. Hay una intención y búsqueda de la Armonía cuando se ordenan partes diferentes en su naturaleza mediante una razón perfecta que conjuntamente crean Belleza... Ella acompaña la vida humana y penetra a través de la naturaleza de las cosas. También todo lo que la Naturaleza hace está medido por las leyes de la Armonía... sin ésta se desintegra la unidad de las partes*".

Hay figuras geométricas de extraordinaria belleza como el círculo, el cuadrado, el triángulo isósceles, las esferas, las pirámides, el cono, y muchas otras que entran por los sentidos, sabiendo que estamos contemplando figuras que tienen una belleza y que posiblemente no podamos explicar. Un conocimiento de las Matemáticas Elementales nos dice que detrás de ellas se esconden números como π , $\sqrt{2}$.

Los pitagóricos decían "Los números determinan todo", conclusión a la que habían llegado mediante un estudio de la filosofía, la ciencia y la teodicea. A lo largo de la historia ha habido una proporción denominada Razón Divina, Razón Áurea, Número Áureo, y que se encuentra en muchas manifestaciones del arte.

Johannes Kepler dijo: "*La Geometría tiene dos tesoros: El Teorema de Pitágoras y la Razón Áurea. El primero puede ser comparado con una medida de oro, el segundo con un diamante*".

CONSTRUCCIÓN DE LA SECCIÓN ÁUREA: ϕ Y Φ

Si tenemos un segmento AC , buscamos un punto B del segmento tal que