

# La Ciencia

desde Morelos  
para el Mundo

---

Tomo III: Química, Física y Matemáticas.

La Unión  
DE MORELOS



ACADEMIA DE CIENCIAS  
DE MORELOS, A.C.

# Gracias

a su credibilidad, el periódico de  
**MAYOR CIRCULACIÓN**



El periódico **más leído** en Morelos



Enfoca  
tu Smartphone  
en el código Bidi

SIGUENOS TAMBIEN POR:



@UniondeMorelos



uniondemorelos

# La Ciencia

desde Morelos  
para el Mundo

---

Tomo III, Química, Física y Matemáticas





# La Ciencia

## desde Morelos para el Mundo

Tomo III, Química, Física y Matemáticas

Editada y compilada por:

**Enrique Galindo Fentanes**, *Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos*  
e Investigador del Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma  
de México, Campus Morelos.

**Joaquín Sánchez Castillo**, *Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos e*  
Investigador de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma del Estado de  
Morelos.

**Edmundo Calva Mercado**, *Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos e*  
Investigador del Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de  
México, Campus Morelos.

**Sergio Cuevas García**, *Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos e*  
Investigador del Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional  
Autónoma de México, Campus Morelos.

**Oscar Davis Martínez**, *Jefe de Redacción de "La Unión de Morelos"*

**Hernán Larralde Ridaura**, *Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos e*  
Investigador del Instituto de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Autónoma de  
México, Campus Morelos.

**Gabriel Iturriaga de la Fuente**, *Miembro de la Academia de Ciencias de*  
Morelos e Investigador del Centro de Investigación en Biotecnología de la Universidad  
Autónoma del Estado de Morelos.

**Georgina Hernández Delgado**, *Miembro de la Academia de Ciencias de*  
Morelos e Investigadora del Centro de Ciencias Genómicas de la Universidad Nacional  
Autónoma de México, Campus Morelos.

---

Formación y diseño:

**Ángel A. Acevedo Martínez** (La Unión de Morelos)

Portada: **Sodio** ([www.sodio.net](http://www.sodio.net))

**Primera Edición 2013**

ISBN: 978-607-95682-3-8

DR © Textos y fotografías de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

**Impreso y hecho en México**

**Este libro no puede ser fotocopiado ni reproducido  
total o parcialmente por ningún otro medio o método  
sin la autorización por escrito de los editores.**



# Índice

<b>Mensaje de La Unión de Morelos</b>	<b>I</b>
<b>Mensaje de la Academia de Ciencias de Morelos</b>	<b>III</b>
<b>Presentación</b>	<b>V</b>
<b>Prólogo</b>	<b>VII</b>
<b>La Química y sus aplicaciones</b>	<b>1</b>
<b>Prólogo</b>	<b>3</b>
<b>El mexicano y el sabor dulce</b>	<b>5</b>
<i>Agustín López Munguía</i>	
<b>¿Con cuántas sustancias puedes endulzar tus bebidas?</b>	<b>9</b>
<i>Agustín López-Munguía</i>	
<b>Un mundo polimérico</b>	<b>11</b>
<i>Mariel Ruiz Kubli, Raúl Arredondo Peter</i>	
<b>Tecnología para la desinfección de agua basada en la generación de ozono</b>	<b>13</b>
<i>Mario Ponce Silva y Jaime Arau Roffiel</i>	
<b>Química cuántica en la naturaleza y en el laboratorio</b>	<b>15</b>
<i>Ramón Hernández Lamonedá</i>	
<b>Cristales, quiralidad y el origen de la asimetría en la naturaleza</b>	<b>17</b>
<i>Thomas Buhse</i>	
<b>Efectos de la contaminación en el patrimonio histórico</b>	<b>19</b>
<i>Jorge Uruchurtu Chavarín, Carmina Menchaca Campos</i>	
<b>El profundo encanto de las dispersiones</b>	<b>23</b>
<i>Ma. Soledad Córdova, Enrique Galindo</i>	
<b>Ductos de combustibles</b>	<b>25</b>
<i>Lorenzo Martínez Gómez</i>	
<b>Historias y cosas de metales</b>	<b>27</b>
<i>Jorge Uruchurtu Chavarín, José M. Malo</i>	
<b>Impacto de la corrosión</b>	<b>31</b>
<i>Jorge Uruchurtu Chavarín</i>	
<b>La ciencia es Física y si no....</b>	<b>33</b>
<b>Prólogo</b>	<b>35</b>
<b>Einstein, la Relatividad Especial y la sincronización de relojes</b>	<b>37</b>
<i>Alejandro Ramírez Solís</i>	
<b>De los materiales conductores, aislantes y semi-conductores a la ley de Moore de las computadoras</b>	<b>41</b>
<i>Alejandro Ramírez Solís</i>	
<b>Terapia por gestos</b>	<b>45</b>
<i>L. Enrique Sucar</i>	
<b>Entender nos enriquece: buscar comprender la mecánica cuántica</b>	<b>49</b>
<i>Julia Tagüeña</i>	
<b>El significado de la palabra “cuántico”</b>	<b>51</b>
<i>Alejandro Ramírez Solís</i>	
<b>La mecánica cuántica y su relación con las matemáticas</b>	<b>53</b>
<i>Natig Atakishiyev</i>	
<b>El oscilador armónico</b>	<b>55</b>
<i>Kurt Bernardo Wolf y Guillermo Krötzsch</i>	
<b>¿Qué rayos con las descargas eléctricas?</b>	<b>57</b>
<i>Jaime de Urquijo</i>	
<b>El tiempo</b>	<b>59</b>
<i>Julia Tagüeña</i>	
<b>Los metamateriales y la capa de Harry Potter</b>	<b>63</b>
<i>Julia Tagüeña y J. Antonio del Río</i>	
<b>¿Qué es la termodinámica?</b>	<b>67</b>
<i>François Leyvraz</i>	
<b>¿Qué es la entropía?</b>	<b>69</b>
<i>François Leyvraz</i>	
<b>Las canicas voluntariosas</b>	<b>71</b>
<i>J. Antonio del Río</i>	
<b>¿Qué es la biofísica?</b>	<b>73</b>
<i>Ramón Garduño Juárez</i>	
<b>¿Qué hacen los biofísicos?</b>	<b>77</b>
<i>Ramón Garduño Juárez</i>	
<b>Vestigios prehispánicos de la nanotecnología en México</b>	<b>81</b>
<i>Jorge A. Ascencio</i>	
<b>Cuatro segundos que pueden salvar una vida: las leyes físicas básicas detrás del manejar seguro</b>	<b>85</b>
<i>Ramón Garduño Juárez</i>	
<b>El sabor en la cocina solar</b>	<b>89</b>
<i>J. Antonio del Río</i>	
<b>De fluidos y tiendas...</b>	<b>93</b>
<i>Hernán Larralde</i>	
<b>Fenómenos naturales en la temporada de lluvias</b>	<b>95</b>
<i>Manuela Calixto y Horacio Martínez</i>	

<b>¿Por qué las brújulas apuntan hacia el norte?</b>	<b>97</b>
<i>Sergio Cuevas García</i>	
<b>Los peines y la codificación homodínea de imágenes dinámicas</b>	<b>99</b>
<i>W. Luis Mochán</i>	
<b>¿Qué es un LÁSER?</b>	<b>103</b>
<i>Alejandro Ramírez Solís</i>	
<b>Los zumbidos y las ciencias exactas</b>	<b>107</b>
<i>W. Luis Mochán</i>	
<b>Descubriendo anillos</b>	<b>111</b>
<i>Luis Benet</i>	
<b>Las simetrías ocultas y el caos</b>	<b>115</b>
<i>Kurt Bernardo Wolf</i>	
<b>Las guitarras, los espejos, las fluctuaciones cuánticas y las matemáticas del infinito: el efecto Casimir</b>	<b>119</b>
<i>W. Luis Mochán</i>	
<b>El monopolio magnético</b>	<b>121</b>
<i>José Fco. Récamier Angelini</i>	
<b>Nanobaterías</b>	<b>123</b>
<i>J. Antonio del Río y Julia Tagüeña</i>	
<b>De la visión natural a la visión artificial: primera parte</b>	<b>125</b>
<i>L. Enrique Sucar</i>	
<b>De la visión natural a la visión artificial: segunda parte</b>	<b>127</b>
<i>L. Enrique Sucar</i>	
<b>Una breve descripción del trabajo de un físico teórico</b>	<b>129</b>
<i>Mariano López de Haro</i>	
<b>¿Es simple el agua simple?, primera parte</b>	<b>133</b>
<i>Humberto Saint-Martin Posada</i>	
<b>¿Es simple el agua simple?, segunda parte</b>	<b>135</b>
<i>Humberto Saint-Martin Posada</i>	
<b>Explorando la complejidad sin complejos, primera parte</b>	<b>137</b>
<i>Gustavo Martínez Mekler</i>	
<b>Explorando la complejidad sin complejos, segunda parte</b>	<b>139</b>
<i>Gustavo Martínez Mekler</i>	
<b>Las matemáticas, música incomparable para el intelecto humano</b>	<b>141</b>
<b>Prólogo</b>	<b>143</b>
<b>¿Por qué las matemáticas parecen difíciles?</b>	<b>145</b>
<i>Luis Javier Álvarez</i>	
<b>Matemáticas en África</b>	<b>147</b>
<i>Kurt Bernardo Wolf</i>	
<b>El cuadrado mágico de Albrecht Dürero, primera parte</b>	<b>151</b>
<i>Radmila Bulajich</i>	
<b>El cuadrado mágico de Albrecht Dürero, segunda parte</b>	<b>153</b>
<i>Radmila Bulajich</i>	
<b>Construcción de cuadrados mágicos (usando el método de Loubère)</b>	<b>155</b>
<i>Radmila Bulajich</i>	
<b>Construcción de cuadrados mágicos (usando los métodos de Hire y Dürero)</b>	<b>157</b>
<i>Radmila Bulajich</i>	
<b>La proporción áurea o lo que tienen en común los pentágonos, el nautilus y la cría de conejos, I</b>	<b>161</b>
<i>Federico Vázquez</i>	
<b>La proporción áurea o lo que tienen en común los pentágonos, el nautilus y la cría de conejos, II</b>	<b>165</b>
<i>Federico Vázquez</i>	
<b>¿Qué rayos significa medir? y ¿por qué las unidades son tal como son?, primera parte</b>	<b>169</b>
<i>Markus Müller</i>	
<b>¿Qué rayos significa medir? y ¿por qué las unidades son tal como son?, segunda parte</b>	<b>173</b>
<i>Markus Müller</i>	
<b>La confusión en la eficiencia de los motores automotrices y el razonamiento matemático</b>	<b>177</b>
<i>Antonio Sarmiento Galán</i>	
<b>El análisis de Fourier</b>	<b>179</b>
<i>Kurt Bernardo Wolf</i>	
<b>El cero y el infinito</b>	<b>181</b>
<i>Kurt Bernardo Wolf</i>	

# Mensaje de La Unión de Morelos

Lo que se siembra, se cosecha. Por eso tiene usted en sus manos éste tercer tomo de “La Ciencia, desde Morelos para el mundo”.

Cuántas cosas han cambiado desde que comenzó un proyecto para llevar a la población en general una parte del vasto conocimiento generado en la entidad por los destacados integrantes de la Academia de Ciencias de Morelos, A.C., a través de publicaciones semanales en las páginas de La Unión de Morelos.

La aceptación fue inmediata. Y surgió la idea de conservar esos materiales y darles una nueva etapa de difusión, ahora en forma de libro, con una estructura temática encaminada a mantener siempre viva su actualidad.

Hoy, en el año 2013, todas los medios de comunicación locales, lo mismo impresos que electrónicos, se han abierto a la ciencia y a la tecnología y es frecuente que difundan la labor de los centros de investigación instalados en Morelos, un panorama muy distinto al de hace apenas unos años.

Por eso, es una enorme satisfacción validar con éste tercer tomo la alianza entre La Unión de Morelos y la Academia de Ciencias de Morelos, una semilla que ha dado buenos frutos.

Un reconocimiento a todos los que forman parte de la Academia, que desinteresadamente ofrecen su tiempo y sus conocimientos a favor de la sociedad de Morelos y de México.

Enhorabuena para todos.

**Ing. Mario Estrada Elizondo**  
Presidente y director general  
La Unión de Morelos





# Mensaje de la Academia de Ciencias de Morelos

La Academia de Ciencias de Morelos, A.C. (ACMor) es una asociación integrada por distinguidos científicos que han sido elegidos por sus méritos académicos y que con su trabajo cotidiano colaboran en la construcción de una mejor sociedad morelense. En particular, uno de los objetivos de la ACMor es el promover la cultura científica. Para cumplir con este objetivo la ACMor ha encontrado un decidido y entusiasta colaborador en el ámbito empresarial: “La Unión de Morelos”. Esta colaboración ha redituado en la publicación de artículos originales de divulgación todos los lunes desde hace más de cinco años. Durante este tiempo los miembros de la Academia de Ciencias de Morelos han abordado una variedad de temas de actualidad y de interés científico compartiendo la información y poniéndola a disposición de la sociedad morelense. Ahora son conjuntados en este tercer tomo aspectos de Física, Química y Matemáticas. Este tomo culmina la compilación de los primeros tres años de exitosa divulgación científica desde Morelos para el mundo de habla hispana.

El esfuerzo que hacen dos organizaciones, una académica y una empresa de comunicación, está dando frutos y la sociedad morelense empieza a considerar la ciencia como parte de su cultura. Estoy seguro que este libro continuará facilitando que la información fluya a mayores sectores de la sociedad. La Unión y la ACMor, en colaboración, contribuyen a crear una cultura científica en la población del Estado de Morelos. Sin duda, este es el camino para generar una mejor sociedad con herramientas para la toma de decisiones con base en el conocimiento.

Jesús Antonio del Río Portilla  
Presidente de la Academia de Ciencias de  
Morelos, A.C. (2013-2014)





# Presentación

La Academia de Ciencias de Morelos, A.C. (ACMor) ha sido realmente afortunada por radicar en un ambiente propicio para la interacción constante entre los investigadores científicos y entre los propios investigadores con la sociedad. Estas interacciones han llevado no sólo a colaboraciones productivas en temas de investigación, sino también a compartir nuestras motivaciones para que nuestro trabajo sea de mayor impacto para la sociedad y contribuya a la construcción de un mejor país y a una visión positiva del futuro de la humanidad. Es así que, cada vez más investigadores escriben artículos de divulgación sobre una creciente gama de temas. Si bien las responsabilidades básicas de los científicos son la generación de conocimiento y la formación de recursos humanos de alto nivel, la gran mayoría de los miembros de la ACMor han descubierto también su enorme potencial de comunicación con la sociedad.

Comúnmente, la relevancia del trabajo de un científico se puede visualizar claramente cuando un descubrimiento básico o un desarrollo tecnológico conducen a una aplicación identificable, como un nuevo producto o servicio, o cuando se considera el número de estudiantes de posgrado que formamos. Sin embargo, es interesante notar que el papel del científico en contribuir a la educación de la sociedad en el método y el quehacer científicos no es generalmente considerado como relevante, cuando, muy probablemente, esto sea por mucho, lo más trascendente a largo plazo. En esencia, el método científico se basa en observar con cuidado cada situación de interés, meditar o analizar sus implicaciones mediante la comparación con hechos ya conocidos, seguido de la observación consecuente. Esto es, el método científico no es ajeno a la conducta cotidiana de cualquier ser humano.

Sin duda, es una fortuna para la ACMor la colaboración que ha mantenido con “La Unión de Morelos”, quien en una decisión editorial que le da liderazgo en el periodismo nacional y constituye un ejemplo a nivel internacional, ha abierto una sección en su edición de los días lunes, a fin de que los miembros de la ACMor aborden diferentes temas que ilustren al público sobre el quehacer científico. Es así que las contribuciones de los primeros tres años se presentan clasificadas en diferentes temas: Ciencia y Sociedad, Biología, Química, Física, y Matemáticas. Es claro que esta clasificación es un tanto subjetiva, pues todos los temas podrían haberse colocado en la primera categoría, aunque se escogieron para dicha sección aquellos que abordan aspectos más generales o con un claro distintivo social. Asimismo, diríamos

afortunadamente, no pocas contribuciones pudieran haber sido clasificadas en algún otro tema, mostrando así la creciente interrelación de la ciencia actual.

Sirva pues esta colaboración entre la ACMor y “La Unión de Morelos” como un ejemplo, que motive a otras comunidades a realizar esfuerzos similares y a demostrar que en México se pueden lograr contribuciones sociales de la ciencia del más alto nivel. ¡Enhorabuena!

### **El Comité Editorial de la ACMor**

2007-2008

Joaquín Sánchez Castillo  
(Coordinador)  
Georgina Hernández Delgado  
Hernán Larralde Ridaura

2009-2010

Enrique Galindo Fentanes  
(Coordinador)  
Edmundo Calva Mercado  
Gabriel Iturriaga de la Fuente  
Sergio Cuevas García  
Hernán Larralde Ridaura

### **El Jefe de Redacción de La Unión de Morelos**

Oscar Davis Martínez

# Tomo III, Química, Física y Matemáticas

## Prólogo

¿Qué distingue al conocimiento de la superstición, la ideología o la pseudo-ciencia? La Iglesia Católica excomulgó a los copernicanos, el Partido Comunista persiguió a los mendelianos por entender que sus doctrinas eran pseudocientíficas. La demarcación entre ciencia y pseudociencia no es un mero problema de filosofía de salón; tiene una importancia social y política vital.

Lakatos, I. (1983).  
*La metodología de los programas de investigación científica*.  
Madrid. Alianza Editorial.

La unidad del saber ha sido siempre uno de los ideales más tenazmente perseguidos por el pensamiento humano. Muchos filósofos han llegado a sostener que «conocer» significa «reducir a unidad»; consiguientemente, la forma más alta de conocimiento del mundo no podía consistir -según estos filósofos- más que en la inserción de todos los fenómenos en un solo sistema. Y este sistema sería tanto más perfecto cuanto menor resultara el número de los principios necesarios para su fundamentación. La aspiración suprema consistía, pues, en encerrar el mundo entero en un cuadro sistemático basado en un solo principio, aunque el cuadro mismo resultara sumamente complejo y dotado de las más diversas articulaciones.

Geymonat, L. (1965).  
*Filosofía y filosofía de la ciencia*.  
Barcelona. Editorial Labor.

En términos generales, el periodismo es el oficio que tiene como fin la búsqueda exhaustiva y la producción de noticias que informen a la sociedad sobre su contexto inmediato. Puede decirse que la labor periodística consiste en recolectar, sintetizar, jerarquizar y publicar información relativa a la actualidad. El periodismo científico es un periodismo especializado centrado en contenidos científicos o tecnológicos. Por otra parte, la divulgación científica se refiere a un conjunto de actividades que interpretan y hacen accesible el conocimiento científico al público general y no debe confundirse con el periodismo científico aunque tengan elementos en común. Quien se dedica a la divulgación de la ciencia es tan importante

como el científico que genera preguntas y descubrimientos, ya que los nuevos conocimientos necesitan un agente difusor que pueda hacerlos llegar al gran público.

En el mundo actual, la divulgación científica se realiza en prácticamente cualquiera de los formatos que existen en los diferentes medios de comunicación. Hasta muy recientemente en nuestro país, y en Morelos en particular, era muy raro encontrar artículos de divulgación científica en los periódicos. Como el financiamiento y la continuidad de ciertas investigaciones pueden depender de la percepción social de las mismas, de manera creciente los investigadores ven en los medios un cauce importante para divulgar su saber y su

hacer. Y en estas circunstancias la alianza establecida entre La Unión de Morelos y la Academia de Ciencias de Morelos para contar con un espacio semanal en el periódico en el que miembros de la Academia han escrito sobre diversos temas de ciencia y tecnología ininterrumpidamente por cerca de cinco años (en estos tres tomos se han incluido los artículos de los primeros tres años), debe ser motivo de orgullo para la sociedad morelense. En los dos primeros tomos de *La Ciencia desde Morelos para el Mundo*, obra que recoge los artículos publicados en esa sección de *La Unión de Morelos*, las contribuciones se organizaron en los rubros de “Ciencia y Sociedad” y “Biología”, respectivamente. En este tercer tomo se han incluido aquellas contribuciones cuyo contenido puede ubicarse dentro de la Química, la Física o las Matemáticas y en cada una de las secciones correspondientes aparece un texto introductorio relativo a las mismas.

Hasta el Renacimiento todo el saber que no fuera técnico o artístico se situaba en el ámbito de la filosofía. El conocimiento de la naturaleza era sobre la totalidad: una ciencia universal. Posteriormente se llegó a la conclusión de que el estudio de la naturaleza se podía hacer mejor si se realizaba de manera fragmentada. Así fue como surgieron la Química, la Física y la Biología, las llamadas Ciencias Naturales. Éstas se apoyan en la Matemática, a la que Carl Friedrich Gauss se refería como “la reina de las ciencias”, cuya relación con la realidad de la naturaleza es indirecta, pero que resulta también una herramienta esencial en muchos otros campos como la ingeniería, la medicina y las ciencias sociales, e incluso en disciplinas que, aparentemente, no están vinculadas con ella, como la música.

La Química es llamada a menudo “ciencia central”, por su papel de conexión con las otras Ciencias Naturales. Se ocupa principalmente del estudio científico de la materia a escala atómica y molecular, en

particular de sistemas como los gases, las moléculas, los cristales y los metales, estudiando su composición, propiedades estadísticas, transformaciones y reacciones. En general, la Física es considerada como una ciencia fundamental, estrechamente vinculada con la Matemática en la formulación y cuantificación de los principios. Incluye el estudio de los componentes fundamentales del Universo, las fuerzas e interacciones que ejercen entre sí y los resultados producidos por dichas interacciones. La formulación de las teorías sobre las leyes que gobiernan el Universo ha sido un objetivo central de la Física desde tiempos remotos, haciendo un uso sistemático de experimentos cuantitativos de observación y prueba como fuente de verificación. Finalmente, la Matemática es una ciencia formal que, partiendo de axiomas y siguiendo el razonamiento lógico, estudia las propiedades y relaciones entre entes abstractos como los números y las figuras geométricas. Ha evolucionado basándose en las cuentas, el cálculo y las mediciones así como en el estudio sistemático de la forma y el movimiento de los objetos físicos. Desde sus comienzos, ha tenido un fin práctico.

Es preciso, antes de cerrar el prólogo de este tomo, volver a señalar que hay que tener cuidado para evitar una mala práctica de la divulgación científica. Así, si una obra de divulgación es escrita por gente que no es experta en el tema que divulga o por personas parciales, el resultado puede ser nefasto ya que, lamentablemente, suele resultar difícil para una persona sin excesiva formación el percatarse de errores graves o de interpretaciones pseudocientíficas. Por ello la Academia de Ciencias de Morelos ha cuidado que los textos que aquí aparecen, así como los contenidos en los dos tomos anteriores, fueran elaborados por miembros de la propia Academia y revisados antes de ir a prensa por su Comité Editorial.

Mariano López de Haro



# **LA QUÍMICA Y SUS APLICACIONES**





# Prólogo

La Química es el mundo de las moléculas y el cambio. En las siguientes contribuciones nos introduciremos a varios aspectos donde la química juega un rol central. Así veremos las moléculas que saben dulce, que son esenciales para nuestra vida, que pueden limpiar el agua, que despliegan propiedades microscópicas inesperadas, que pueden distinguir entre izquierda y derecha, que pueden formar burbujas pero que también pueden destruir aquello que nos gusta o necesitamos.

Agustín López nos conduce hacia los orígenes culturales de México en la búsqueda de nuestra preferencia por el sabor dulce (El mexicano y el sabor dulce) que ha guiado a nuestro país a ser el consumidor líder global de refrescos con base en el consumo per cápita. Los problemas típicos de salud de la sociedad mexicana actual tales como obesidad y diabetes pueden ser rastreados en la dieta mexicana por la sustitución de endulzantes saludables por alimentos industrialmente procesados con cantidades considerables de – muchas veces escondidos – azúcares. En una contribución posterior (¿Con cuántas sustancias puedes endulzar tus bebidas?) el mismo autor nos explica la variedad de nuevos edulcorantes que son una alternativa para endulzar nuestro café sin consumir la misma cantidad de calorías como si usáramos azúcar de caña. Finalmente el autor nos recuerda que una dieta bien balanceada y el uso prudente del azúcar y sus sustitutos pueden hacer nuestra vida más dulce y sana al mismo tiempo.

Jaime Arau y Mario Ponce nos muestran una alternativa elegante al uso del, a veces dañino o al menos con mal sabor, cloro que empleamos para desinfectar agua (Tecnología para la desinfección de agua basada en la generación de ozono). La idea es usar una molécula simple hecha de tres átomos de oxígeno que conocemos de un tópico muy diferente: el ozono. El ozono, un agente oxidante muy poderoso, no sólo es un componente importante de la atmósfera de la Tierra que filtra la luz ultravioleta sino que también es extremadamente eficiente a nivel de tierra por su capacidad de eliminar bacterias tóxicas, es decir, volver limpia el agua sucia.

El ozono juega un papel también en la contribución de Ramón Hernández (Química cuántica en la naturaleza y en el laboratorio). El autor nos explica como las soluciones prácticas en Química tienen su punto de partida en estudios teóricos que están basados en principios microscópicos donde los átomos y las moléculas se describen. Obtendremos un interesante punto de vista en las reacciones de fase gaseosa involucrados en la problema de la erosión del ozono así como la interacción entre los gases y el agua que

pueden dirigir la formación de pequeños compuestos sólidos llamados clatratos y que tienen una aplicación importante en las reservas de energéticos.

Thomas Buhse dedica su atención a una cuestión fundamental (Cristales, quiralidad y el origen de la asimetría en la naturaleza) sobre el aún desconocido origen de la asimetría derecha-izquierda en la naturaleza. Aún no se resuelve porque la mayoría de nosotros tenemos nuestro corazón recostado sobre el lado izquierdo, es decir, porque no hay una distribución equitativa de gente con el corazón recostado hacia la derecha o la izquierda. La respuesta podría encontrarse en el nivel molecular donde la química, la dinámica de los procesos químicos y tal vez los cristales juegan un papel importante en la determinación de la simetría en nuestra biosfera.

Jorge Uruchurtu y Carmina Menchaca (Efectos de la contaminación en el patrimonio histórico) tratan un problema importante causado por la contaminación del aire, a saber la degradación permanente e irreversible de los patrimonios históricos, arqueológicos y culturales. Los autores nos explican la química detrás de la destrucción que notamos cuando caminamos a través de los centros históricos del mundo. Básicamente, el problema se origina de la lluvia ácida, es decir la lluvia se vuelve ácida debido a los contaminantes del aire. Así la solución requeriría de cambios en nuestros hábitos en la dirección de una disminución de la contaminación de nuestro medio ambiente.

Mayonesa, leche, margarina, cremas, espumas – estamos en contacto con estos productos cotidianamente pero rara vez nos preguntamos que tienen todos ellos en común. Ma. Soledad Córdova y Enrique Galindo (El profundo encanto de las dispersiones) nos llevan en un viaje a través de la diversidad de las llamadas dispersiones. Somos introducidos en las formas en que se hacen las dispersiones y aprendemos que las burbujas de una espuma pueden cambiar su forma para volverse parte importante del tejido celular – ellas adoptan la misma forma, por cierto, que se usó para la estructura del techo del Centro Acuático Olímpico en Pekin. Una vez más, la naturaleza nos guía en la construcción de nuestro mundo.

Lorenzo Martínez (Ductos de combustibles) nos regala una visión fascinante de la enorme red de ductos de combustibles que son esenciales para mantener el impulso de nuestra vida diaria. Él nos explica que uno de los problemas en los ductos se origina por la corrosión. Los metales también son tratados en la contribución de Jorge Uruchurtu y José M. Malo (Historias y cosas de metales) donde los

autores explican las diferentes fuentes y formas de metales que podemos encontrar en nuestra planeta y su posible extracción y aprovechamiento. De la misma manera que con los ductos de combustibles, en este tema también nos encontramos con la confrontación de procesos naturales de corrosión y el interés de los seres humanos por obtener metales puros para su uso en una gran variedad de aplicaciones tecnológicas – un

tema que también discute Jorge Uruchurtu (Impacto de la corrosión) quien nos da una idea química de este proceso, así como opciones para proteger los materiales de la corrosión.

¡Ojalá disfrutes de las siguientes contribuciones !

**Thomas W. Buhse**

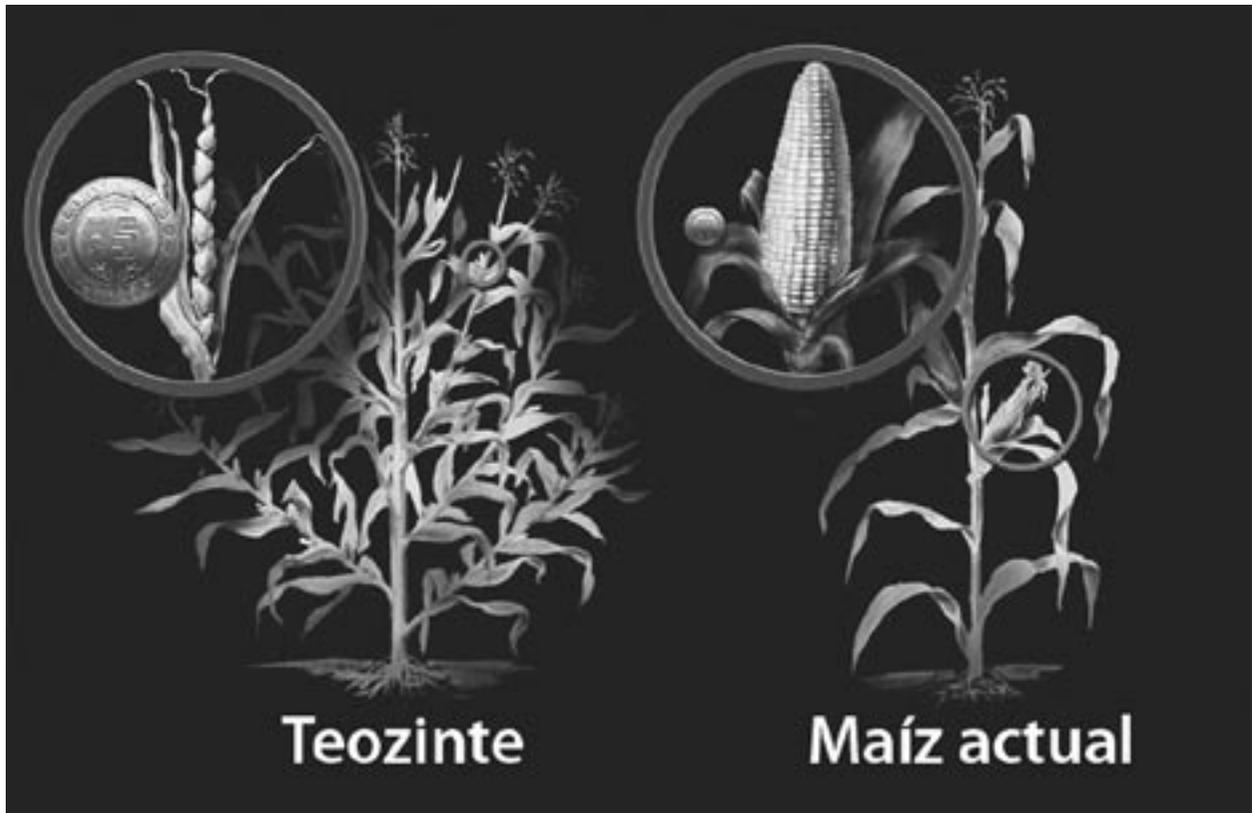
# El mexicano y el sabor dulce

**Agustín López Munguía**

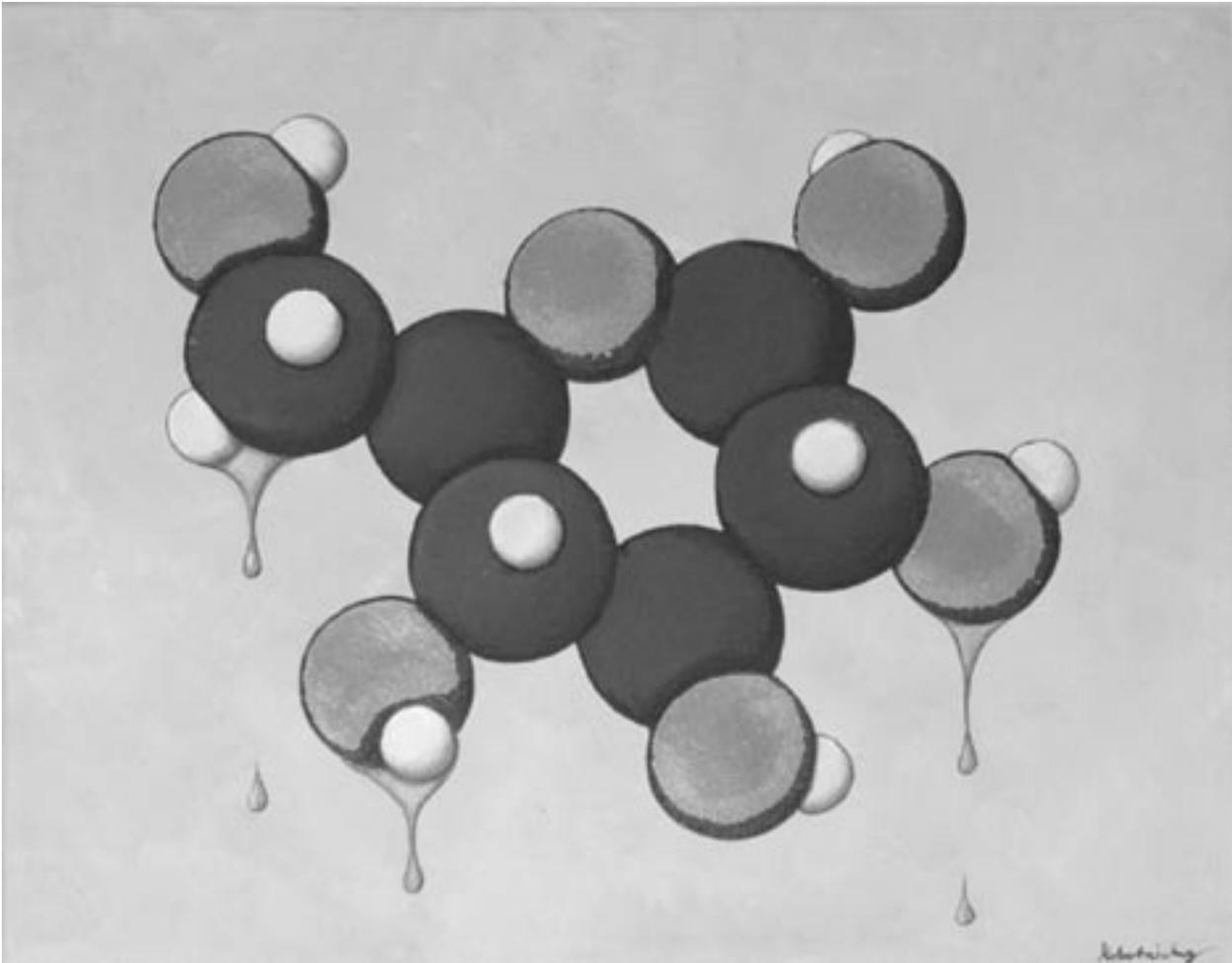
Instituto de Biotecnología, UNAM, Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Para todos es claro que los seres humanos somos atraídos por el sabor dulce de manera natural: pero me temo que los mexicanos mucho más. En general el consumo de azúcar en sus diversas formas (la *sacarosa* de la caña o la *glucosa* y la *fructosa* de las frutas o de la miel) data de los orígenes de las culturas y representó por siglos una señal que indicaba que los alimentos eran seguros. Es por eso que preferimos las frutas a las verduras y tendemos a rechazar los alimentos amargos, asociados con componentes tóxicos. Muy temprano en nuestra historia descubrimos que, al margen de las frutas, existían en la naturaleza fuentes de sabor dulce muy concentrado, como lo demuestra el hecho de que a los mayas veneraran a *Ah Macencab*, dios de la miel (*kaab* en maya puede significar fuerza, tierra, país, mundo y abeja), de cuyo consumo también hay evidencias en pinturas rupestres de las cuevas de Altamira, España. Esto es sin duda debido a la absoluta necesidad que tiene nuestro cuerpo de energía y particularmente nuestro cerebro

de glucosa: “*Tomo azúcar, luego pienso; pienso luego existo*” diría hoy Descartes. Sin embargo nuestro caso es muy particular: los mesoamericanos, que nos asumimos como “*hombres de maíz*.” bien hubiéramos podido conocernos también como “*hombres de azúcar*” y no por el hecho de que seamos uno de los grupos humanos más afectados por el exceso en su consumo, sino por los azares de la genética. Y es que el proceso de domesticación del maíz consistió en una serie de mutaciones genéticas del teosinte, su pariente más cercano. Recordemos que el teosinte tiene pocos granos, y además duros, con una pared tan gruesa que los hace no digeribles por los humanos ¿Qué llevó entonces a nuestros antepasados a sembrar una y otra vez una planta de la que no se alimentaban? ¿Para qué lo sembraban? Una hipótesis planteada hace unos cuantos años por el destacado antropólogo Luis Vargas (se puede consultar la revista *Cuadernos de Nutrición*, de junio de 2007), es que en un inicio, lo que interesaba a los antiguos mexicanos eran los



Esquemas del Teosinte y del maíz actual (crédito: Plant Genome Sciences, adaptada por N. Quinto).



La molécula de glucosa, en versión del artista Alexander Kobulnicky (<http://www.alexanderkobulnicky.com>), reproducida con autorización. En oscuro se observan los seis átomos de carbono, con líneas sus seis átomos de oxígeno y en blanco algunos de sus doce átomos de hidrógeno.

azúcares que están presentes en el tallo de la planta, y al sembrarla una y otra vez para disfrutar del azúcar, se encontraron con los cambios que dieron a la mazorca su carácter comestible. Los azúcares se forman en las hojas de la planta, se almacenan en su tallo y migran a la mazorca sólo cuando la planta ha sido polinizada. Así, nuestros antepasados disponían de azúcar en una miel obtenida del tallo del maíz, mucho antes de descubrir las ventajas de dejar que los granos de la mazorca maduraran para usarlas como alimento. A las mieles de maíz como fuente prehispánica de dulce, podemos agregar algunas otras, como el aguamiel que se extrae de los agaves (*Agave salmiana*), y que también consumían fresco o secado al sol, antes de que los microorganismos les hicieran el milagro de transformarlo en *pulque*. De la misma planta y ya en el terreno de los dulces, el *quiote* asado constituye hasta la fecha una succulenta fuente de azúcar. En materia de fuentes más sofisticadas de azúcar, los niños en el estado de Hidalgo aún se divierten extrayendo y degustando “hormigas meleras” de sus hormigueros. Se trata de hormigas (*Myrmecosistus melliger*, *M. mexicanus*) y que en Oaxaca conocen como “*teocondudi*” a las que la naturaleza convenció

de comportarse como abejas y almacenan azúcar que colectan de noche de ciertas plantas, en un vientre que se deforma por el exceso del dulce. Una advertencia que hasta la fecha seguimos sin escuchar.

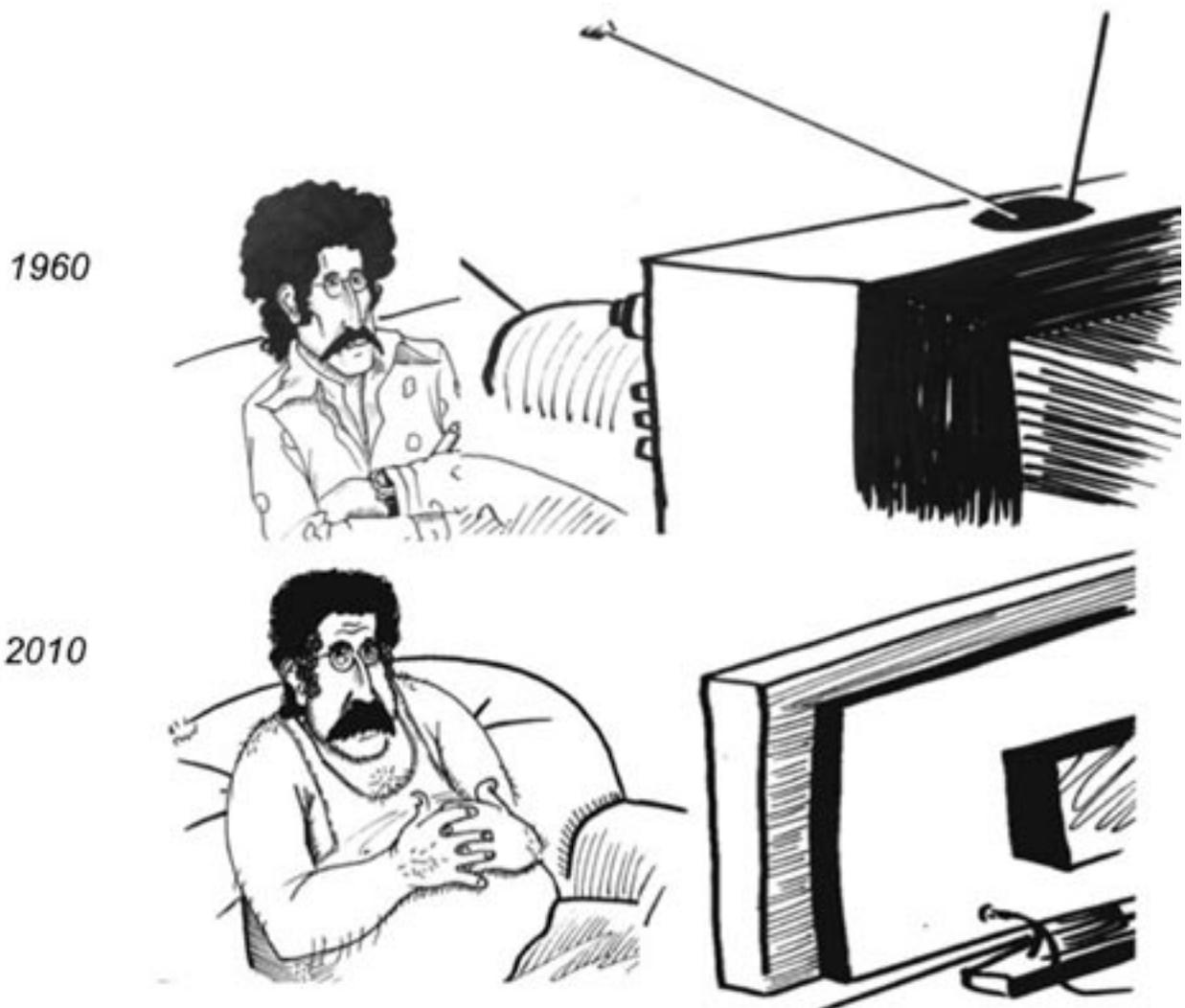
Con la conquista llegaría otra fuente de azúcar concentrada: la caña de azúcar, que contiene sacarosa, nuestro actual azúcar de mesa. Cuando los mesoamericanos se endulzaban la vida con mieles de abejas silvestres, de caña del maíz, de agave e incluso de las tunas, Venecia era ya el centro del comercio del azúcar de caña aunque su consumo en Europa no tenía gran difusión, ya que –como hasta ahora– los europeos disfrutaban más los alimentos por su aroma natural y son menos propensos a endulzarlos. Por el contrario, en la Nueva España, el consumo de azúcar de caña se expandió como reguero de pólvora. A esto contribuyeron más tarde los conventos de monjas donde se inventaron las más variadas golosinas. Aquí se desarrollaron por ejemplo los “conos de panocha” o piloncillo, que la Marquesa Calderón de la Barca definió como “panes de azúcar tosca que el pueblo prefiere al azúcar refinada” Un poco venida a menos, la confitería constituye una importante sección del caleidoscopio que representa la cocina mexicana.

Por cierto, desde el 1 de agosto de 2010, la cocina mexicana es oficialmente patrimonio intangible de la humanidad de acuerdo con la declaración de patrimonio universal por la UNESCO.

La producción de azúcar se extendió por todo el país, a tal grado que en la actualidad (2010) contamos con cerca de 60 ingenios con capacidad para producir más de seis millones de toneladas de azúcar. Durante varios siglos vivimos una relación más o menos saludable con el azúcar, tanto en el plano económico –por haber sido una importante fuente de empleo, de actividad económica y de divisas–, como en el social –por ser el azúcar como ya hemos dicho, una fuente de placer–. Los problemas se empezaron a agravar hacia el primer cuarto del siglo XX, época en el que llegaron a nuestro país los refrescos embotellados, particularmente, la *Coca Cola* en 1926. No tengo nada contra esa oscura bebida – yo mismo consumo una o dos latas a la semana para darle un poco de “chispa

a mi vida” activándola con la cafeína que contiene- pero los mexicanos en promedio bebemos 400 ml de refrescos AL DÍA, lo que nos pone a la cabeza del mundo en este terreno. A esto hay que agregarle la infinidad de productos dulces, pastelillos y galletas, mediante las cuales nuestro consumo de azúcar se va a las nubes: y nuestro peso corporal también. Soy enemigo de comer contando calorías, pero a veces la situación lo amerita: por cada lata de refresco (de 355 ml) que consumimos, nos cargamos de suficiente energía a través del azúcar que contiene como para caminar un par de kilómetros. Pero, si no los caminamos, entonces se nos va quedando la reserva para algún otro día... para cuando haya tiempo, tiempo que, desafortunadamente, nunca llega; al menos no antes que el siguiente refresco.

Es un hecho y un orgullo nacional, que dentro de los aportes de México al mundo se encuentra el maíz con sus múltiples razas, colores y sabores.



*Sobre la evolución de los seres humanos y de la televisión (dibujo de Juan Velázquez).*

Sin embargo hay un “aporte” (entre comillas) del mundo a México basado en el maíz, que ha tenido un considerable impacto en nuestra dieta. En efecto, a partir de los años sesenta del siglo pasado se introdujo en los Estados Unidos y Europa una nueva fuente de azúcar concentrada obtenida del maíz, pero no del tallo como hacían los nuestros, sino directamente de la mazorca del maíz amarillo. Se trata de un proceso industrial mediante el cual el *almidón* de los granos se transforma en una mezcla de proporciones aproximadamente similares de *glucosa* y *fructosa*. No entiendo por qué la industria y la prensa se refieren a estos azúcares como “*jarabes de fructosa*” pues se trata de una mezcla con apenas un poco más de *fructosa* que de *glucosa*. Tampoco entiendo por qué algunos dicen incorrectamente “*fructUOsa*” en vez de “*fructosa*” (pero no dicen *glucUOsa*). Actualmente en los Estados Unidos todos los refrescos y la mayor parte de los dulces se elaboran con estos “*jarabes de fructosa*” y ya no usan sacarosa. Dado que durante las décadas pasadas (y hasta la fecha) México tenía que importar maíz y era autosuficiente en azúcar de caña para endulzar los refrescos y las mesas de los mexicanos, no se veía el sentido de hacer el cambio de edulcorante. Pero el tratado de libre comercio permitió que se abrieran las fronteras, con inexplicables desventajas para México, existiendo hasta la fecha dificultades para exportar azúcar de caña a los Estados Unidos. Eso sí, a la fecha no sólo importamos jarabes de fructosa sino que se fabrican ya

en México poco menos de un millón de toneladas al año, obviamente con maíz importado. Es justo señalar aquí que hubo esfuerzos por detener esta invasión del dulce, aplicando impuestos a la importación de *fructosa*, pero México fue llevado a tribunales internacionales obligando al país a abrir las fronteras, con un tremendo impacto sobre la industria cañera. Hoy, en los EUA se debate sobre el impacto de los “*jarabes de fructosa*” en el problema de obesidad que también los aqueja. Cabe señalar que no hay una ventaja del azúcar de caña en este sentido, pues la *sacarosa* es una combinación química de *glucosa* y *fructosa*, y que no nos irá mejor endulzando con una cosa o la otra, sino moderando el consumo de azúcar. No nos engañemos, tampoco es una ventaja endulzar con azúcar morena, mascabado o incluso con mieles de agave. Químicamente estamos hablando de lo mismo: *glucosa, fructosa o sacarosa*.

Que quede claro: el problema de obesidad y diabetes que afecta a la sociedad mexicana es complejo y depende de muchos factores, incluidos otros elementos de la dieta como el excesivo consumo de grasas y de alimentos chatarra, además del sedentarismo y cierta predisposición genética. O sea que el problema no radica exclusivamente en el azúcar, pero sí influye de manera preponderante el exceso con el que la hemos incorporado a nuestra dieta, convirtiendo esta “atracción ancestral” en una adicción que nos enferma, al grado de tener que recomendarles mantener el azúcar lejos del alcance de los niños.

# ¿Con cuántas sustancias puedes endulzar tus bebidas?

**Agustín López Munguía**

Instituto de Biotecnología, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A.C.

Como consecuencia de los problemas actuales de obesidad entre la población, aunado con los avances en el conocimiento científico de los mecanismos que nos permiten percibir la sensación que llamamos “dulce”, se han desarrollado nuevos edulcorantes que en principio permitan endulzar nuestras bebidas, pero que no aporten las calorías que tiene el azúcar de caña. Conviene saber que hay muchos tipos de azúcar desde el punto de vista de la química, y que al azúcar de la caña tenemos que llamarle así, azúcar de caña, para no confundirlo con otros, o de plano “sacarosa” que es su nombre químico. A tal grado llegan, tanto el problema de la obesidad, como nuestra obsesión por comer cosas dulces, que el mercado mundial de los llamémosles “edulcorantes alternativos” –por usar el lenguaje de moda- alcanza ya cifras estratosféricas: cerca de 3,500 millones de dólares, de acuerdo con

reportes financieros recientes (2007). Más de la mitad de este mercado se ubica en los Estados Unidos y Europa.

Sin duda alguna aquellos para quienes el azúcar de caña es veneno (los diabéticos), o para quienes desean disminuir las calorías en su alimentación, para evitar la caries dental, claramente asociada con el consumo de azúcar de caña, o simplemente para quienes quieren evitar este veneno moderno de su dieta, los “edulcorantes alternativos” son una opción atractiva. Y qué bueno por ellos. Mientras más alternativas tengamos para endulzar el café o el agua de limón, mejor. Recordemos que todo alimento y toda sustancia que usemos con ellos, es un tóxico potencial: por ejemplo la sal, la pimienta, el chile o desde luego el azúcar. Es decir, que no hay ningún alimento o aditivo maravilloso o 100% seguro y cualquiera cosa



que ustedes consuman, si la consumen en exceso, tarde o temprano tendrá un efecto nocivo en la salud. Lo importante en la alimentación es comer de todo y variado, como dicen los nutriólogos. Pero es curioso que hasta hace sólo unas décadas, para endulzar no había muchas opciones: o endulzaba uno con miel, o lo hacía con azúcar de caña (en sus diversas variantes: refinada, estándar o incluso como piloncillo). Hoy las opciones son mucho más variadas. Curiosamente, para dar el sabor salado a los alimentos tampoco hay mucho de donde escoger: o la sal (cloruro de sodio) es prácticamente la única opción, pues las alternativas que hay por el momento son insoportables para un paladar decente (cloruro de potasio).

Una primera opción, ya bastante extendida entre nosotros, es la llamada “fructosa” que viene en forma de “jarabes de fructosa”. Noten que no hay “u” entre la “t” y la “o” en el nombre pues mucha gente la llama erróneamente “fructuosa”. Este azúcar se elabora industrialmente a partir del maíz, y ha venido a competir con el azúcar de caña por el gran mercado que representan los refrescos, afectando seriamente la estructura de la industria azucarera nacional. Habría que empezar por reconocer que quienes deciden que azúcar tomamos con los refrescos (sacarosa de la caña o jarabe fructosado del maíz) no somos nosotros sino la industria refresquera que sin dudarlo un instante, emplea el que le cuesta menos. Paradójicamente en México tenemos maíz, pero no alcanza para dedicarlo a producir este azúcar y la gran mayoría viene de los EUA. Por otro lado, no hay “jarabes de fructosa” en el “super” pero la fructosa también se puede obtener de los agaves y de una planta que se denomina “chicorea”. De ésta sí hay en las tiendas, particularmente en las naturistas, pero cuidado con quienes pretenden venderles ese azúcar como “natural” pues tan natural es la fructosa que se obtiene del maíz, como la que

podría obtenerse de la caña de azúcar (la sacarosa es mitad glucosa y mitad fructosa) como la que viene del agave: ambas tienen que sufrir un proceso químico para llegar a la mesa. Espero en una futura entrega, entrarle al tema de lo natural y lo no natural, o si existe realmente un “endulzante natural” pues todos requieren de una manera u otra de una transformación industrial. Como sea, el aporte en calorías es el mismo, y como los “jarabes de fructosa” en realidad lo son de glucosa y fructosa, tampoco son adecuados para diabéticos, ni para los obesos pues aportan igual número de calorías. Eso sí, son menos cariogénicos (es decir que no provocan caries) que el azúcar de caña.

Y para el que no quiere calorías y contribuye al mercado al que me refería al inicio, dispone del aspartamo (cuyo nombre comercial es *Canderel* o *Nutrasweet* y es el más usado en refrescos dietéticos), la sucralosa (conocida como *Splenda*, la más usada en el consumo directo) y la sacarina. Hay varios más, pero aun son poco conocidos en México: el acesulame K (ace-K) y el neotame. Pronto habrá en los restaurantes o cafeterías sobrecitos con endulzantes artificiales de muchos colores y será muy difícil escoger con cual endulzar, por lo que hay que empezar por leer e informarse. Esto también para no ser víctimas de las campañas de terror que de pronto surgen contra una sustancia u otra. El mercado de la obesidad y el sobrepeso es tan disputado que no es de dudar que mucho de lo que se dice contra una sustancia u otra sea alentado por la competencia. Por lo pronto tanto la sucralosa como el aspartame, e incluso la sacarina (aprobada sólo en 90 países), han mostrado ser inocuos, siempre y cuando no se beba uno más de 50 latas de refresco dietético al día, caso en el cual, lo más seguro es que se muera uno de otra cosa. Así que, endulce con lo que quiera, pero hágalo de manera informada y consciente.

# Un mundo polimérico

**Mariel Ruiz Kubli**

Estudiante de la Licenciatura en Ciencias (área terminal en Química)  
Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos

**Raúl Arredondo Peter**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

¿Porqué un mundo polimérico? En este artículo veremos que los polímeros forman parte de nosotros y lo que nos rodea. Iniciemos por definir a un polímero. De acuerdo con el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, esta palabra significa “compuesto de varias partes”. Dichas partes, llamadas monómeros, se repiten una y otra vez para dar lugar a un polímero. Un ejemplo es una cadena que está formada por eslabones, en donde la cadena completa corresponde al polímero y cada eslabón a un monómero.

Existe una infinidad de polímeros. Unos se encuentran en forma lineal, formados por una cadena única de monómeros, o bien pueden estar ramificados. Los polímeros pueden estar formados por un solo tipo de monómeros o por una variedad amplia de unidades monoméricas. Los polímeros se clasifican en 3 categorías según su origen: polímeros naturales, sintéticos y semisintéticos. Los polímeros naturales provienen de la naturaleza, por ejemplo, de los seres vivos, los polímeros sintéticos son fabricados por el hombre, y los polímeros semisintéticos se obtienen a través de transformaciones químicas de los polímeros naturales. Día tras día tenemos contacto con estas súper moléculas, por lo que este artículo de divulgación se enfoca en contagiar al lector del asombro por la enorme cantidad y variedad de polímeros con los que interactuamos. ¡Es inevitable escapar de ellos! Tomemos un ejemplo con la joven que se ilustra en la figura 1. El lector se preguntará ¿qué tiene que ver esto con los polímeros? Esta joven se encuentra leyendo una revista (véase el número 1 en la figura), la cual tiene hojas que están formadas por un polímero natural llamado celulosa. La celulosa forma la pared de las células vegetales, y sus monómeros son unidades de glucosa (que es un carbohidrato). Por otro lado, este polímero también se utiliza en la fabricación de explosivos; el más conocido es la nitrocelulosa, que es la celulosa modificada químicamente con grupos nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), y que se utiliza para hacer la pólvora de las armas. Por lo tanto, la nitrocelulosa es un polímero semisintético. El número 2 en la figura 1 señala el barniz que embellece las uñas de la joven, el cual también contiene nitrocelulosa. Finalmente, la celulosa es la materia prima para fabricar el rayón, que se utilizó para confeccionar la ropa de nuestra modelo

(número 3 en la figura 1).

Para ejemplificar a los polímeros sintéticos tomemos a la suela de los zapatos tenis de la joven (número 4 en la figura 1), la cual está compuesta por un polímero llamado polipropileno (que abreviaremos como PP). El monómero del PP es una molécula llamada “propeno” que se obtiene a partir de los productos iniciales durante la refinación del petróleo. El PP se utiliza para fabricar juguetes, jeringas, baterías, tapicería, ropa interior y deportiva, alfombras, cables, selladores, partes automotrices y cajas para CDs, entre muchos otros productos. La bolsa de papas fritas (número 5 en la figura 1) también contiene PP (y aluminio, que es un metal). Los anteojos que



Figura 1. Una joven viviendo de polímeros y entre polímeros.

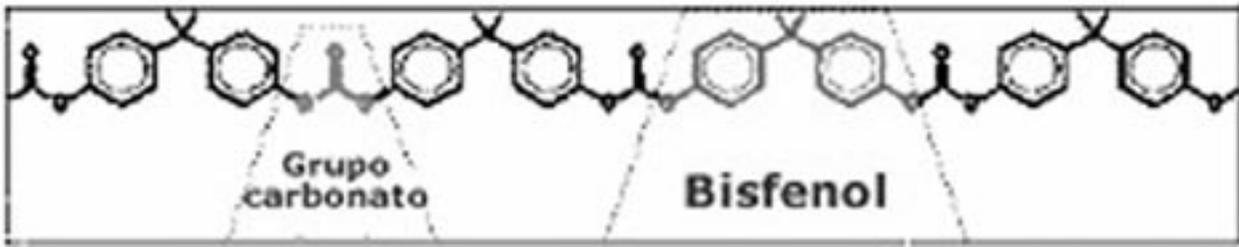


Figura 2. Cadena de policarbonato formada por grupos funcionales bisfenol y carbonato.

usa nuestra modelo (número 6 en la figura 1) están hechos de cristales orgánicos de otro polímero, el policarbonato (que abreviaremos como PC). El PC está formado por grupos químicos bisfenol unidos por grupos carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (véase la figura 2). El PC se utiliza para fabricar CDs, DVDs y algunos componentes de computadoras, y, por su resistencia y transparencia, se utiliza para fabricar materiales de seguridad, como son los cristales antibalas y los escudos antidisturbios que utiliza la policía. ¡Los astronautas que fueron a la luna utilizaron cascos con máscaras fabricadas con PC! Los cosméticos con que se maquilló la joven para salir muy guapa en la fotografía (número 7 en la figura 1) están hechos de polietileno (que abreviaremos como PET). La botella de refresco (número 8 de la figura 1) está hecha de PET, y este polímero también lo podemos encontrar en los detergentes. El PET es un plástico, y los plásticos, como el PP, provienen de la refinación del petróleo. Sin embargo, es importante aclarar que no todos los polímeros forman plásticos, aunque todos los plásticos son polímeros.

Por otra parte, la joven no solamente interactúa con polímeros en el exterior, sino que su cuerpo está formado por biopolímeros naturales. Los principales biopolímeros son los ácidos nucleicos (como el ácido desoxirribonucleico, o ADN), las proteínas y los polisacáridos (o carbohidratos). Los monómeros de estos polímeros naturales son los nucleótidos, aminoácidos y monosacáridos, respectivamente. Entonces, regresando a nuestra modelo (de la figura 1), en el núcleo de cada una de sus células (número

9) está contenido el ADN. Éste es un biopolímero de cadena doble formado por nucleótidos (figura 3). El ADN contiene la información genética que es necesaria para el desarrollo y funcionamiento de los organismos vivos y algunos virus. Asimismo, el ADN es el responsable de la transmisión hereditaria. Las proteínas son biopolímeros formados por cadenas lineales de aminoácidos, las cuales llevan a cabo una cantidad enorme de funciones en el cuerpo de la joven. Por ejemplo, su pelo y las uñas (números 10 y 11 en la figura 1, respectivamente) están formados por queratina, la cual es una proteína del tipo estructural. Por las venas y arterias de su cuerpo fluye la sangre (número 12 en la figura 1). En ésta encontramos a la hemoglobina, que es la proteína responsable de transportar el oxígeno desde los pulmones hasta las células de los tejidos. Los polisacáridos son polímeros cuyos monómeros constituyentes son los monosacáridos. Estos biopolímeros llevan a cabo funciones diversas, aunque en particular funcionan como reserva energética y al formar estructuras. Un ejemplo de ello es la celulosa. Sí, he aquí a la celulosa de nuevo, la molécula que escogimos para iniciar este breve recorrido por “un mundo polimérico”, y con la que concluiremos esta contribución.

Como pudo darse cuenta el Lector en los párrafos anteriores, los polímeros están por todas partes. Algunos forman parte de nosotros, los seres vivos, y otros los sintetizamos para hacer nuestra vida más placentera. Dentro o fuera, de una u otra manera, estas moléculas hacen nuestro mundo, la Tierra, nuestra casa polimérica.

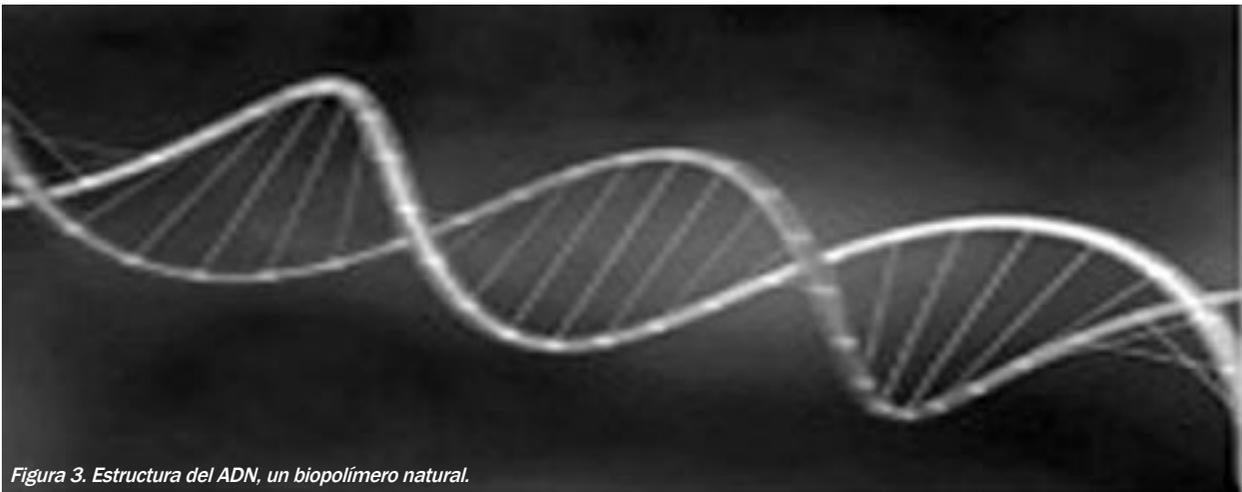


Figura 3. Estructura del ADN, un biopolímero natural.

# Tecnología para la desinfección de agua basada en la generación de ozono

**Mario Ponce Silva**

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico-CENIDET

**Jaime Arau Roffiel**

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico-CENIDET

Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Debido al consumo desmedido de recursos naturales, en años recientes se ha tomado conciencia sobre la necesidad de cuidar de ellos: un ejemplo claro es el agua. El 70 % de la superficie del planeta está compuesta por este vital líquido; sin embargo, el 97.5 % del agua es salina, el resto es agua dulce. Por su parte, el 68.9 % del agua dulce se encuentra congelada en bancos de hielo, glaciares y nieves perpetuas, el 30.8 % en aguas subterráneas y sólo el 0.3 % se localiza en lagos, lagunas, ríos y humedales, por lo que menos del 1 % del agua dulce del mundo está disponible para el uso humano.

En México, muchos mantos acuíferos se encuentran contaminados o son sobreexplotados, y sólo el 27 % de las aguas superficiales son aceptables. Adicionalmente, en relación al sistema de distribución de agua, entre el 30% y 50% del agua utilizada para el abastecimiento público se pierde en fugas.

Derivado de esta situación, surge la necesidad de purificar el agua contaminada, eliminando diversos materiales dañinos como el amonio, los desechos orgánicos y otros componentes. Existen varios métodos para la desinfección del agua, desde métodos sencillos como la purificación solar que consiste en la exposición de pequeñas cantidades de agua a la radiación ultravioleta proveniente del sol, la filtración, la sedimentación y la cloración, hasta métodos más complejos como la ósmosis inversa, la radiación ultravioleta y la ozonificación.

En la actualidad, métodos como la radiación ultravioleta y la generación de ozono son mucho más eficientes que los métodos tradicionales como la cloración, sobre todo por la eliminación de efectos colaterales tales como la modificación del sabor del agua o los problemas gástricos asociados. Una de las ventajas más importantes del uso del ozono en la desinfección del agua, es su gran efectividad en lograr la eliminación de las bacterias, ya que el ozono destruye la membrana de las células bacterianas, dejándolas expuestas al medio ambiente, lo que provoca su muerte. La tecnología electrónica requerida para llevar a cabo esta muy importante aplicación, representa un gran reto para los investigadores que

trabajan en esta área del conocimiento, dado que implica el diseño de circuitos que manejan voltajes y frecuencias elevados con alta eficiencia, y cumplir con este objetivo no es tarea fácil. El Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), a través del grupo de investigación de “Electrónica de Potencia y sus Aplicaciones”, trabaja en este tema de gran importancia para la sociedad.

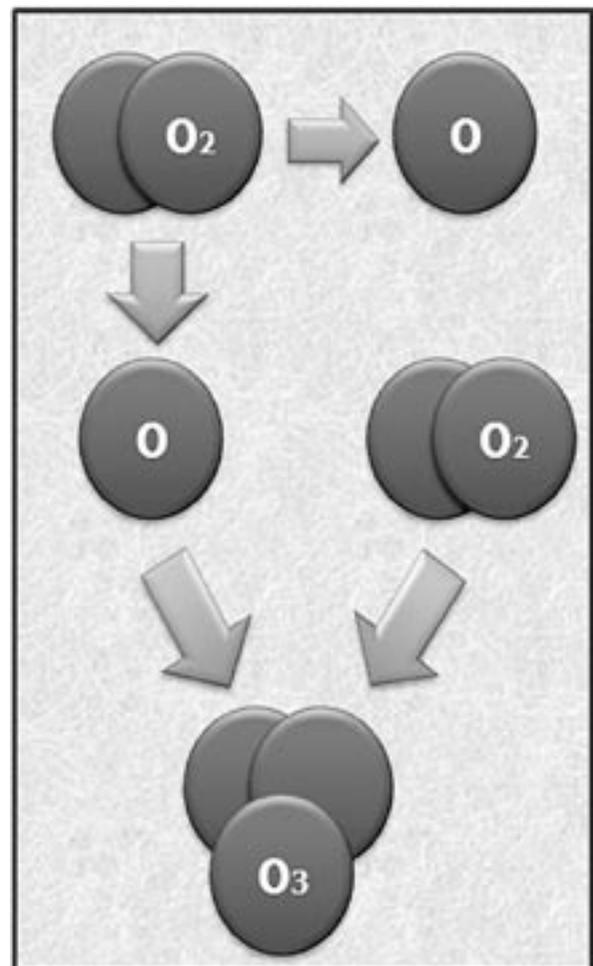


Figura 1. Formación de moléculas de ozono.

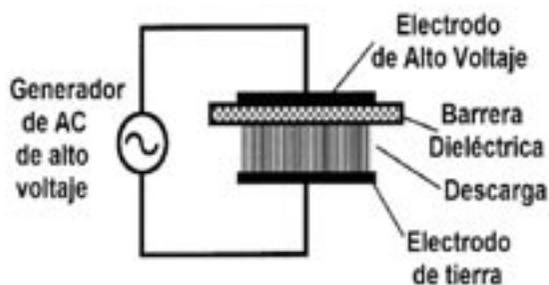


Figura 2. Componentes necesarios para la descarga de barrera.

## El ozono y sus aplicaciones

Históricamente, el primer indicio de la existencia de este gas se reporta en 1839, cuando Schönbein identificó el olor saliente de un ánodo durante la electrólisis del agua como un nuevo componente químico, al que le dio el nombre de ozono. Tras el descubrimiento de la capacidad del ozono como desinfectante en 1886, la empresa alemana Siemens & Halske fue contratada por oficiales prusianos interesados en utilizar al ozono en la desinfección de agua. Los resultados de las pruebas en la primera planta piloto, publicadas en 1891, demostraron la efectividad del ozono para eliminar bacterias. A partir de ese momento, ha crecido el interés en el ozono y sus posibles aplicaciones.

Como se indica en la figura 1, el ozono está constituido por tres átomos de oxígeno ( $O_3$ ) y es considerado como uno de los desinfectantes más eficaces; entre sus características típicas se encuentra el ser altamente oxidante, presentar un color azul claro en altas concentraciones, tener un olor picante y penetrante, y un tiempo de vida de entre 20 minutos (a una temperatura ambiente de 25 °C), a algunos segundos (arriba de los 40 °C). Además de emplearse para desinfección del agua, es ampliamente usado en aplicaciones médicas, odontológicas, de la industria alimenticia, la deodorización, el blanqueo textil y la desinfección en general.

El principal problema en el manejo del ozono es que al ser un gas altamente inestable, no puede ser producido y almacenado para su uso posterior, ya que una vez almacenado se descompone nuevamente en oxígeno. Por lo tanto, es necesario producirlo en el momento en que se va a utilizar. Los métodos para producir ozono son el uso de luz ultravioleta, la electrólisis y las descargas eléctricas. Estas últimas son las que proporcionan los niveles de concentración más altos y son muy utilizadas en sistemas comerciales.

Se conoce como descarga eléctrica en un gas al flujo de electrones que se presenta a través del medio expuesto a un diferencial de voltaje. Existen varios tipos de descargas eléctricas, de los cuales, el que más se utiliza para producir ozono es la descarga de "efecto corona". Esta descarga se caracteriza por la formación de un halo luminoso que adopta una forma de corona y que comúnmente antecede a la descarga de arco, llamada así por la forma que despliega entre

los electrodos. Esta última es más conocida por su uso en soldadura e iluminación y puede observarse en los relámpagos. La descarga de efecto corona se diferencia de la descarga de arco en que su intensidad es mucho menor. Sin embargo, es muy inestable y fácilmente se convierte en descarga de arco; para evitar esto se agrega un material no conductor, es decir un dieléctrico, entre los electrodos de la descarga, que se encarga de impedir la descarga en arco. Al agregar un dieléctrico la descarga de efecto corona cambia a lo que se conoce como la Descarga de Barrera Dieléctrica (DBD). La DBD no sólo se utiliza para la generación de ozono, es la base de las modernas pantallas de plasma y de la tecnología de pantallas luminiscentes flexibles. En la figura 2 se ilustran las partes necesarias para producir una descarga de barrera dieléctrica.

Desde un punto de vista tecnológico, existen retos importantes que están siendo resueltos a partir de las aportaciones de la Electrónica de Potencia, uno de ellos es el incrementar la producción de ozono de una manera más eficiente. Investigaciones recientes indican que la aplicación de ondas de voltaje pulsantes a la DBD, lo que implica aplicar un diferencial de voltaje durante tiempos cortos, incrementa sustancialmente la intensidad de la descarga eléctrica generando más ozono. La generación de este tipo de formas de onda de manera eficiente es factible mediante el uso de circuitos típicos de la Electrónica de Potencia.

Actualmente (2010), en el grupo de Electrónica de Potencia del CENIDET, se está trabajando en la aplicación de la DBD para la generación de ozono, así como de luz artificial (que es otro tema muy interesante que seguramente trataremos en otro artículo ya que la aplicación es totalmente diferente). A la fecha, se ha desarrollado un generador de ozono portátil (ver figura 3) que permite desinfectar agua de una manera sencilla y económica, y se sigue trabajando en diferentes mejoras para incrementar su eficiencia, sobre todo en términos de generación de ozono y, en consecuencia, en su capacidad de desinfección de agua (esto es, más litros de agua desinfectada por unidad de tiempo).

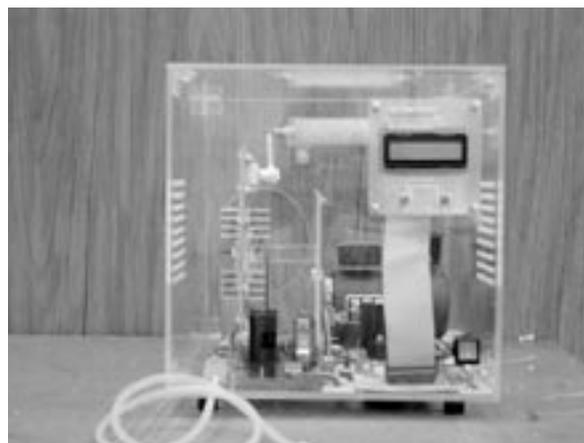


Figura 3. Prototipo experimental de generador de ozono desarrollado en el CENIDET.

# Química cuántica en la naturaleza y en el laboratorio

**Ramón Hernández Lamonedá**

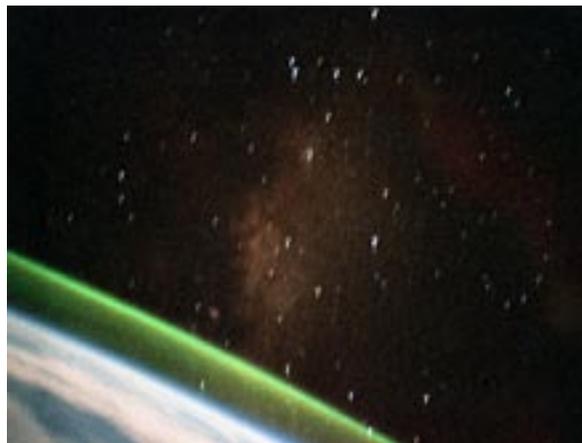
Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

En los libros de texto que yo utilicé en secundaria se solía marcar el comienzo de la química moderna con los experimentos de Antoine Lavoisier (1743-1794) acerca de la conservación de la masa en las reacciones químicas. Indudablemente estos son una piedra angular para la parte experimental de la química. Algunos se preguntarán: ¿acaso no es la química 100 % una ciencia experimental? Aunque habrá distintas opiniones de los expertos, yo creo que la respuesta no es tan directa: A principios del siglo XX nació la descripción cuántica de la luz y la materia, indispensable para comprender y predecir las propiedades de átomos y moléculas. Una pieza central de la teoría cuántica es la ecuación de Schrodinger (ecuación que describe el comportamiento de las partículas a nivel atómico y subatómico) y cuya solución permite describir con todo detalle las propiedades de los sistemas cuánticos. Por ejemplo, su solución para el caso del átomo de hidrógeno permitió entender por primera vez la razón de ser de otra de las piezas clave de la química: la tabla periódica de los elementos. En mi opinión esto marca el comienzo de la química teórica moderna. Actualmente la investigación en química se ocupa de una variedad muy amplia de procesos que pueden ir desde reacciones químicas elementales involucrando unos pocos átomos hasta reacciones que involucran varias etapas, miles de átomos y que ocurren en ambientes complejos como por ejemplo el interior de una célula. Todos estos procesos pueden estudiarse con las herramientas desarrolladas por la química teórica. En el caso de sistemas de unos pocos átomos, a través de la solución matemática de la ecuación de Schrodinger, es posible predecir sus propiedades con un grado de detalle que reproduce los datos obtenidos de los experimentos más sofisticados realizados a la fecha. Conforme aumenta la complejidad del sistema molecular bajo estudio es necesario recurrir a aproximaciones que limitan la exactitud de las predicciones pero que muchas veces dan lugar a una comprensión de los fenómenos que no se podría obtener de otra forma.

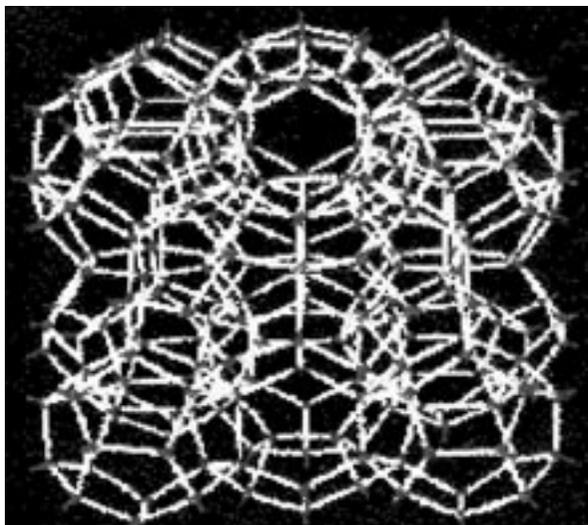
Mi área de interés es el estudio detallado de la estructura e interacción de las moléculas, los procesos de absorción y emisión de luz por moléculas (espectroscopía molecular) y los procesos de transferencia de energía en colisiones moleculares incluyendo las reacciones químicas. Nuestros estudios

permiten analizar los movimientos moleculares tales como rotación, vibración y disociación, así como las excitaciones de los electrones asociados a las moléculas. El análisis de estos procesos se reduce a la solución de la ecuación de Schrodinger y en este sentido nuestras herramientas teóricas están basadas en principios físicos y métodos matemáticos para resolver ecuaciones. A continuación describo algunos ejemplos concretos de mis líneas de investigación:

**TRANSFERENCIA DE ENERGÍA EN COLISIONES DE OXÍGENO MOLECULAR:** El oxígeno molecular es el segundo componente en abundancia en la atmósfera y es vital para la vida en la tierra. Su relevancia se extiende a otras propiedades de la atmósfera como la luminiscencia nocturna (debida a la recombinación de átomos y subsecuente emisión de luz) y la formación de ozono, componente de la capa que nos protege de los rayos ultravioleta al producirse su fotodisociación (disociación de la molécula tras la absorción de luz). Podría esperarse que dada la aparente simplicidad de estos sistemas y su importancia, ya deberían conocerse con lujo de detalle todas sus propiedades. Sin embargo, este no es el caso y todavía hay preguntas abiertas que son tema de investigación de frontera. En la década de los 90 un problema de gran importancia era la caracterización de los procesos que forman y destruyen ozono en la estratósfera. Nuestros cálculos mostraron que la velocidad de reacción de moléculas de oxígeno



*Luminiscencia nocturna originada por la emisión de luz debida a la recombinación de átomos en la atmósfera.*



*Clatratos: celdas poliédricas formados por moléculas de agua que pueden atrapar pequeñas moléculas gaseosas en su interior.*

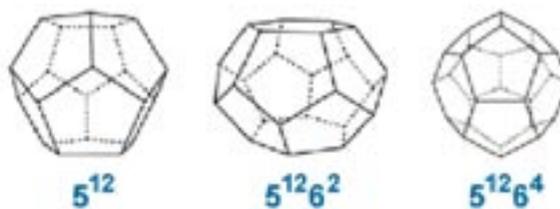
altamente excitadas vibracionalmente para formar ozono es muy lenta para competir con otros procesos de transferencia de energía y por lo tanto no juega un papel en la concentración de ozono estratosférico. Más recientemente, en colaboración con investigadores del CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España), hemos predicho el mecanismo principal que permite transferir la energía vibracional a energía electrónica entre moléculas de oxígeno y esperamos esto sea confirmado en estudios experimentales realizados en el laboratorio. En el caso del nitrógeno, procesos similares juegan un papel en el fenómeno de las auroras.

Desde un punto de vista de generación de nuevo conocimiento, el estudio detallado de sistemas moleculares pequeños ha permitido el descubrimiento de interesantes efectos, como por ejemplo el que la velocidad de algunos procesos aumente al disminuir la temperatura, contrario a lo que ocurre en la gran mayoría de casos. De hecho, el estudio de las propiedades moleculares en condiciones ultrafrías es un área reciente de gran interés dada la posibilidad de descubrir nuevas propiedades moleculares en estas condiciones extremas. Por ultrafrío se entiende temperaturas que se pueden conseguir en el laboratorio (milésimas de grado Kelvin por encima del cero absoluto o menores ) y que son mucho menores que las del vacío en el espacio interestelar.

**FUERZAS INTERMOLECULARES Y ESPECTROSCOPIA EN LA INTERACCIÓN DE DIHALÓGENOS (CLORO, BROMO, YODO) Y AGUA:** El concepto de fuerza intermolecular es central para la descripción microscópica de una amplia variedad de fenómenos naturales. Como su nombre lo indica son las fuerzas responsables de asociar a las moléculas y en términos macroscópicos se pueden relacionar con una variedad de procesos cotidianos, como por ejemplo, la condensación del vapor de agua o el hecho de que el agua y el

aceite no se mezclen. Recientemente (2010) hemos iniciado una colaboración con investigadores de la Universidad de California (Irvine) en Estados Unidos, para caracterizar la interacción de moléculas de dihalógeno con moléculas de agua. La interacción entre las mismas presenta características especiales que han justificado el bautizarlas con el nombre de ‘enlace de halógeno’ en analogía al famoso ‘enlace de hidrógeno’ responsable de las propiedades únicas del agua y de la estructura de proteínas y ácidos nucleicos. Una de nuestras principales motivaciones es ampliar nuestro conocimiento de los llamados hidratos gaseosos o clatratos. Estos sólidos se constituyen de celdas poliédricas (dodecaedros y otros derivados del mismo) formadas enteramente por moléculas de agua y cuyos vértices se unen precisamente por enlaces de hidrógeno entre moléculas de agua. Estas estructuras no son estables por sí mismas, es decir, se transforman de manera espontánea en hielo. Sin embargo, al atrapar pequeñas moléculas gaseosas en el interior de las celdas se convierten en estructuras estables. Los llamados clatratos de halógeno se conocen desde 1811; sin embargo, solo recientemente se han iniciado estudios espectroscópicos detallados que permitirán conocer sus propiedades estructurales y dinámicas. Por medio de herramientas teóricas podemos calcular las propiedades de estos clatratos, ayudar en la interpretación de los espectros (el espectro de un sistema muestra la intensidad con la que este absorbe luz de distintas frecuencias) obtenidos en el laboratorio y hacer nuevas predicciones de su comportamiento. Además del interés propio en estos sistemas desde el punto de vista de ciencia básica, otra fuente importante de motivación es que el mayor depósito natural de gas metano se encuentra en forma de clatratos en los océanos. Este hecho, por un lado, representa un peligro al considerar que cambios de temperatura podrían desestabilizar a los clatratos, liberándose el metano con consecuencias catastróficas, y por otro lado, representan la posibilidad de explotar la fuente natural más importante de este gas. Análogamente hay mucho interés en utilizar a los clatratos como medio de transporte de combustibles o para atrapar gases que causan el efecto invernadero, tal como el dióxido de carbono.

Espero que esta breve introducción a mis líneas de investigación haya mostrado la amplitud de temas que pueden abordarse con las herramientas de la química teórica, incluyendo la descripción de nuevas y fascinantes propiedades moleculares así como su relación con problemas de interés en ciencia aplicada.



*Clatratos: el mayor depósito natural de metano en los océanos, se encuentra en esta forma.*

# Cristales, quiralidad y el origen de la asimetría en la naturaleza

**Thomas Buhse**

Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A.C.

Una cuestión fundamental en los estudios del origen de la vida está relacionada con la quiralidad. Se dice que dos objetos son quirales si su estructura contiene los mismos elementos pero su disposición espacial es diferente, de tal manera que uno es la imagen en el espejo del otro. Nuestras manos son el ejemplo perfecto de objetos quirales: la mano izquierda es la imagen en el espejo de la mano derecha y viceversa. A estos objetos que son imágenes al espejo entre sí se les denomina enantiómeros. La quiralidad también es un fenómeno que se presenta a nivel molecular y es posible clasificar a cada par de enantiómeros moleculares como L- ó D- en función de la estructura molecular. De manera sencilla, L- se puede asociar a una orientación espacial izquierda y D- a una orientación derecha. Diferentes formas de clasificar a los enantiómeros han sido desarrolladas, aunque no profundizaremos en este sentido.

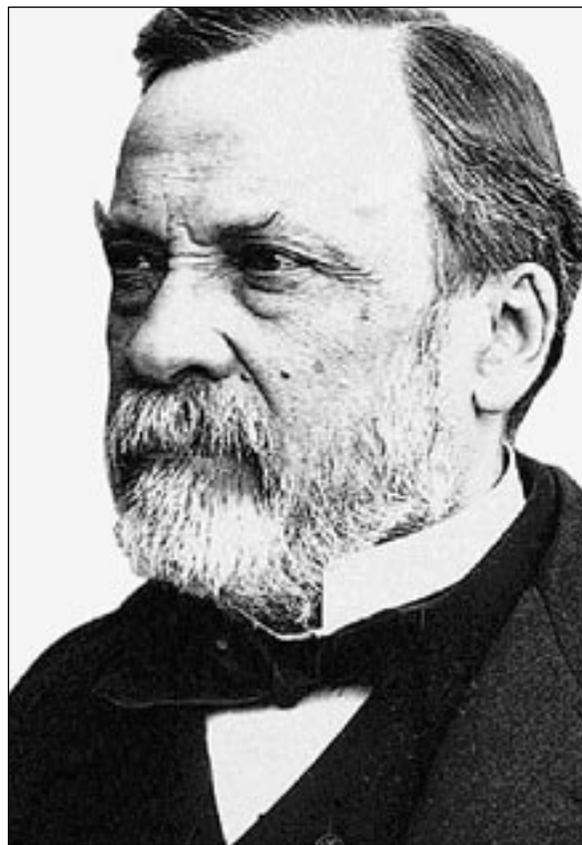
Nos dirigiremos hacia una observación fundamental en las unidades moleculares básicas que componen a los seres vivos. Es bien conocido que las proteínas que consumimos diariamente están formadas de aminoácidos y, por otro lado, que el consumo excesivo de carbohidratos ó azúcares es dañino por los problemas de obesidad y diabetes que puede ocasionar. Sin embargo, casi nadie sabe que los aminoácidos y los carbohidratos son especies químicas quirales y en la naturaleza solo existe un enantiómero de cada uno, es decir L-aminoácidos y D-carbohidratos. Contrariamente, los D-aminoácidos y los L-carbohidratos prácticamente no existen en nuestro mundo.

Lo anterior indica que la naturaleza ha seleccionado una quiralidad para la vida en nuestro planeta. Sin embargo, el origen de esta quiralidad natural aún se mantiene como uno de los acertijos en el origen de la vida desde el descubrimiento de la quiralidad molecular por Louis Pasteur, hace más de 150 años. Desde entonces se han desarrollado teorías y experimentos para comprender porqué la naturaleza tiene una quiralidad específica. Por ejemplo, durante mucho tiempo se discutió si este fenómeno fue un requisito para la vida o bien una consecuencia de la misma. Ahora se sabe que el primer caso es el correcto, porque un ambiente con una quiralidad ya seleccionada es necesario para la aparición de moléculas complejas como el ADN y ARN, que

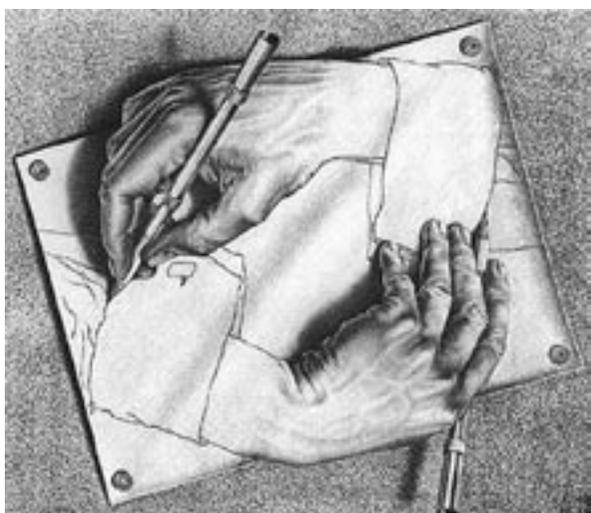
conforman el material genético de los seres vivos.

¿Cómo ocurrió la selección natural de L-aminoácidos y D-carbohidratos? Buscando mecanismos naturales capaces de seleccionar moléculas en función de su quiralidad y que pudieran ocurrir antes de que la vida apareciera, encontramos que las superficies minerales y los cristales pudieron jugar un papel importante.

Un ejemplo prominente de cristales que pueden ser encontrados en nuestro planeta es el cuarzo. Los cristales de cuarzo tienen una morfología enantiomérica aunque las moléculas que lo componen no son quirales. De esta manera, es posible distinguir a simple vista entre dos cristales enantiómeros de cuarzo, ya que estos se asemejan a una hélice que gira a la izquierda o a la derecha de manera similar a la cuerda de un tornillo. Por cierto, ¿has notado



*"El universo es disimétrico..." (Louis Pasteur, 1858)*



*Nuestras manos (M.C. Escher, 1948) son el ejemplo perfecto de objetos quirales (imágenes en el espejo) pero la quiralidad también es un fenómeno que se presenta a nivel molecular.*

que la cuerda de los tornillos se fabrica de tal manera que gira a la derecha? Generalmente a la hélice izquierda se denominan l- y a la hélice derecha d-. Volviendo a los cristales de cuarzo, se ha demostrado que los cristales l adsorben preferentemente en su superficie a moléculas de quiralidad L. Estas moléculas pueden ser de importancia biológica como los aminoácidos y carbohidratos. Una mezcla de aminoácidos que contenga a L y D mostrará una disminución en uno de los enantiómeros debido a su adsorción en el cuarzo. Así, tal vez, pudo ocurrir la adsorción selectiva en la que D-aminoácidos se adsorbieron preferentemente a superficies cristalinas, permitiendo que la vida emergiera en presencia de un exceso de L-aminoácidos. Algo similar ocurriría con los carbohidratos.

De esta manera pudo ocurrir la selección fisicoquímica entre moléculas quirales de relevancia biológica, mucho tiempo antes del inicio de la biología en la tierra. Sin embargo, aún existe un problema fundamental por resolver: las leyes de la simetría en física predicen que el número total de cristales de cuarzo l y d debe ser exactamente igual. Por ello, al decir que un cristal de cuarzo l favorece la selección de D-aminoácidos en una parte del mundo, se debe pensar entonces que este fenómeno debería ser compensado por un cristal d, dando preferencia a los L-aminoácidos en alguna otra parte del mundo.

Entonces, la única manera de obtener un mundo enriquecido con moléculas de una quiralidad específica es posible, sólo si hay un exceso de una de las dos morfologías quirales de los cristales. Pero ¿cómo alcanzar esta situación? Esto parece un ejemplo del problema clásico del “huevo y la gallina”.

En 1990, Dilip K. Kondepudi de la Universidad Wake Forest, en Carolina del Norte, estudió la cristalización de clorato de sodio  $\text{NaClO}_3$ . El clorato de sodio es una sal inorgánica y, de manera similar

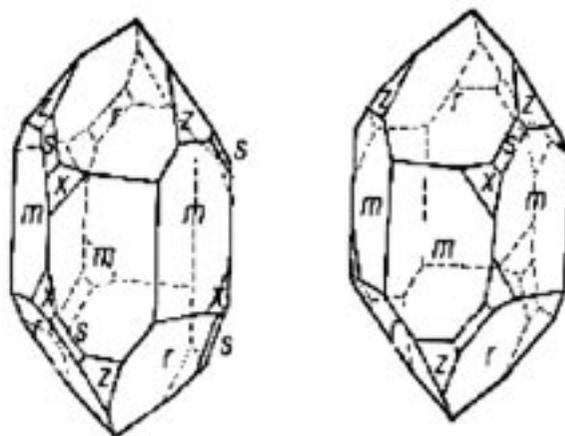
al cuarzo, la molécula no es quiral pero sus cristales tienen una morfología l- ó d-. El procedimiento más común de cristalizar es disolver el compuesto hasta lograr una solución saturada, que se mantiene en reposo mientras que el disolvente se evapora lentamente. Cristalizar el clorato de sodio a partir de una solución en reposo produce cantidades iguales de cristales l y d, manteniendo la simetría. Si la solución saturada se agita durante el periodo de cristalización entonces se forman exclusivamente cristales l ó d. En cada repetición del proceso se selecciona solo una forma enantiomérica, por tanto ocurre la aparición de sólo un tipo de cristal en un fenómeno llamado “ruptura de la simetría quiral”.

Se ha propuesto que la ruptura de la simetría en la cristalización, bajo agitación, ocurre en dos procesos: 1) la formación de un primer cristal que crece lentamente, llamado cristal madre, y 2) la formación rápida de una multitud de cristales pequeñísimos. Aparentemente la presencia del cristal madre, l ó d, detona la cristalización rápida de millones de diminutos cristales. Además, el cristal madre imprime su propia morfología quiral en todos los cristales del segundo proceso. La cristalización rápida disminuye la concentración de clorato de sodio disuelto, impidiendo la formación de otros cristales madre.

Dentro del mecanismo antes descrito es importante remarcar que la retroalimentación, proceso por el cuál el cristal madre induce la formación de cristales con la misma morfología quiral, y la inhibición, con lo que suprime la formación de nuevos cristales madre, son procesos clave para la ruptura de la simetría quiral.

Con este tipo de procesos es posible resolver el problema del “huevo y la gallina” mencionado arriba: cristales de una quiralidad específica son generados por cristalización bajo agitación y pueden -en sus superficies- separar selectivamente moléculas quirales y generar un medio ambiente para la aparición de la vida en la Tierra.

El autor agradece al Dr. Jesús Rivera Islas (CINVESTAV) por su ayuda y sugerencias en la redacción de este artículo.



*Cristales de cuarzo: un cristal “zurdo” es la imagen en el espejo de un cristal “diestro” y viceversa.*

# Efectos de la contaminación en el patrimonio histórico

**Jorge Uruchurtu Chavarín**

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

**Carmina Menchaca Campos**

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos

La contaminación es casi tan antigua como el hombre, siendo resultado de sus actividades económicas y sociales. El problema es particularmente importante en relación al deterioro de materiales de construcción y de edificios del patrimonio histórico, arqueológico y cultural; en especial la piedra natural expuesta a la intemperie que se ve afectada por los contaminantes presentes en la atmósfera. La contaminación tiene un efecto directo o indirecto en los materiales reduciendo su vida activa, dañándolos y desfigurándolos, ennegreciendo sus superficies

y dándoles una apariencia desagradable. Esto es especialmente importante en los edificios y objetos de interés histórico-arquitectónico ya que esto degrada o destruye la herencia cultural y el sentido de continuidad de los pueblos y ciudades.

De forma general, el impacto debido a la lluvia ácida en estructuras se divide en tres partes: a) impacto en materiales naturales como calizas y areniscas; b) en materiales hechos por el hombre como son los metales y c) el impacto en monumentos históricos y sitios arqueológicos. El deterioro puede ocurrir debido a la



*Esculturas degradadas por el agua y la corrosión química.*

disolución y/o fractura de la piedra. Las piedras calizas y areniscas contienen carbonatos que reaccionan con el ácido sulfúrico del agua de lluvia y las disuelven. Los metales son corroídos por las sustancias agresivas presentes en la atmósfera y en el agua de lluvia.

De Oxford a Atenas, muchas antigüedades, edificios, pinturas y estatuas han sido destruidas por la contaminación atmosférica. Es emblemático el caso del obelisco de Cleopatra, con una antigüedad de 3000 años y que cuando fue transportado de Alejandría a Londres en 1878, sufrió un mayor deterioro expuesto a la atmósfera londinense, que el sufrido previamente en Egipto.

Desde siempre la atmósfera ha contenido una cierta cantidad de contaminantes provenientes de fuentes naturales. Estas fuentes están constituidas principalmente por partículas de tierra en suspensión, sales, bacterias, semillas y esporas, actividad volcánica, etc.. En las ciudades y zonas industriales, el hombre genera una gran cantidad y diversidad de contaminantes debido a la actividad industrial, el transporte y los servicios; siendo la contaminación de dos tipos: partículas y gases. Aún en atmósferas puras, los materiales pueden verse afectados por la humedad, la lluvia o las heladas. La piedra o el concreto pueden quebrarse al absorber agua.

La contaminación atmosférica puede dañar los materiales por cinco mecanismos, que son: erosión, depósito y remoción, ataque químico directo, ataque químico indirecto y corrosión electroquímica.

Ningún material resiste indefinidamente la acción de los agentes atmosféricos como humedad, temperatura, lluvia, luz solar y el viento. Sin embargo, en la actualidad la contaminación atmosférica es el factor más importante del deterioro o envejecimiento prematuro de los materiales de construcción. Los contaminantes principales en el proceso de deterioro son los gases como el bióxido de carbono y los compuestos ácidos del azufre y los productos sólidos de la combustión como el hollín.

Los efectos de la contaminación atmosférica relacionados con el envejecimiento de los materiales de construcción dependen en gran medida del contenido de carbonatos. La piedra caliza y los mármoles consisten esencialmente de carbonato de calcio el cual reacciona con el bióxido de azufre para formar sulfato de calcio. Las calizas de magnesio reaccionan con el bióxido de azufre formando sulfato de calcio y sulfato de magnesio, los cuales son solubles en agua.

El carbonato de calcio es poco soluble en agua pura, pero en presencia del bióxido de carbono disuelto en agua de lluvia, su solubilidad aumenta dando como resultado la remoción de material calcáreo. Debido a que esta solución es inestable, al evaporarse el agua el carbonato de calcio removido y disuelto en agua de lluvia, se deposita en otra parte de la superficie de los edificios de piedra caliza y/o mármoles.

Las superficies de mármol y piedra caliza, expuestas libremente a la intemperie, son erosionadas por la lluvia aún en atmósferas libres de contaminantes.



*Fachada en la que se han perdido bloques completos, que ha habido que reponer con materiales similares.*



*Erosión (por disgregación) de una arenisca.*

En atmósferas contaminadas, la erosión es más pronunciada en las superficies lavadas por la lluvia. Esto no es de gran importancia a menos que se trate de esculturas o bajo-relieves. La erosión continua previene que el hollín se adhiera a la superficie expuesta y ésta se mantiene razonablemente limpia. Las superficies cubiertas o a la sombra, acumulan hollín que forma un recubrimiento que contrasta con las superficies limpias expuestas a la intemperie. Cualquier escurrimiento produce zonas de limpieza que contrastan con el resto de la superficie oscura, además de formar depósitos debajo de cornisas y relieves. Estos depósitos, consistentes de material de carbón y sulfato o carbonato de calcio pueden alcanzar grandes proporciones.

Las piedras areniscas y el granito, no siendo solubles en agua, tienden a ennegrecerse sobre toda la superficie en atmósferas contaminadas por humos. Esto hace que las superficies expuestas a la intemperie y las zonas más cubiertas no muestren mucho contraste en su apariencia como las superficies de piedras calizas. Los depósitos acumulados se unen con materia silíceo presente en los materiales formando compuestos poco solubles que son difíciles de remover. Sin embargo, el poco silicio presente en solución parece actuar como cemento en los productos sólidos de la combustión como el hollín, al adherirse éstos a la superficie. Los efectos dañinos del bióxido de azufre en la piedra se manifiestan en forma de escamas o costras, o de desintegración general de la superficie. La reacción química entre el bióxido de azufre (o sulfato de amonio) en aire y lluvia y los carbonatos presentes en la piedra lleva a la formación de sulfato de calcio y sulfato de magnesio.

El bióxido de azufre incrementa la acidez del agua de lluvia y acentúa la erosión de las superficies expuestas a la intemperie. Además, induce la

cristalización de los sulfatos formados, causando el envejecimiento prematuro y deterioro de los materiales. La cristalización del sulfato de magnesio en los poros de la piedra causa desintegración por la acumulación de las sales. El sulfato de calcio, aunque menos soluble, produce efectos parecidos y, además, cuando se deposita en la superficie de la piedra, forma una capa dura que se transforma en costras que eventualmente se desprenden de la superficie, dejándola suave y arenosa, permitiendo un continuo desmoronamiento.

Los mármoles, calizas y piedras areniscas calcáreas también están expuestos a los efectos del bióxido de azufre. Esto se debe a que dependen para su cohesión de la pequeña cantidad de carbonatos que sirven para cementar los granos de silicio. Aún los materiales inmunes al ataque directo del bióxido de azufre pueden dañarse si se utilizan en combinación con piedra caliza que absorba sulfatos, o agua de lluvia que acarree cierta cantidad de sulfato de calcio que se acumule en la superficie de la piedra, formando desagradables costras.

Otro efecto importante es el llamado biodeterioro, que es el daño físico o químico efectuado por diferentes tipos de organismos en objetos, monumentos o edificios que pertenecen al patrimonio cultural. Dentro de los procesos de biodeterioro intervienen bacterias quimiolitotróficas, autótrofas y heterotróficas; hongos, algas, líquenes, musgos y plantas superiores. Entre las bacterias se pueden mencionar: las tiobacterias, las silicobacterias y las bacterias nitrificantes. Estas últimas son capaces de metabolizar y transformar los nitratos en nitritos, los sulfatos en sulfuros; produciéndose en presencia de agua: ácido nítrico y nitroso y sus sales de amonio, ácido sulfhídrico, etc. que afectan a los materiales.



# El profundo encanto de las dispersiones

**Ma. Soledad Córdova**

Instituto de Biotecnología, UNAM Campus Morelos

**Enrique Galindo**

Instituto de Biotecnología, UNAM Campus Morelos

Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Las dispersiones forman parte de nuestra vida cotidiana, ya que están presentes en muchos productos de uso común, por ejemplo, la mayonesa, la margarina, la crema pastelera y las cremas cosméticas. Las espumas también son dispersiones, como la que se genera por el rompimiento de las olas en el mar o al servir la cerveza y otras bebidas gasificadas.

Pero, ¿qué es una dispersión? El verbo “dispersar” tiene varios significados, entre otros, esparcir, disipar, desplegar, extender, distribuir, difundir, disolver, romper, etc. Para todas estas acciones se necesita agitación, ya sea mecánica o neumática. El movimiento debe ser generado por agitadores

o por presión de un gas, para permitir que, tanto sólidos como líquidos y gases se distribuyan en otros materiales, conformando una unidad en la que todos los ingredientes estén en contacto.

Las dispersiones que podemos encontrar en los procesos industriales, se definen, según el número de fases involucradas: bifásicas, de dos fases; trifásicas, de tres fases y tetrafásicas, de cuatro fases. De otra manera, las dispersiones pueden denominarse de acuerdo a sus componentes, como líquido-líquido, gas-líquido y gas-líquido-sólido. Si la dispersión es de un líquido compuesto de gotas (fase dispersa) en el seno de otro líquido (fase continua) con el que no se

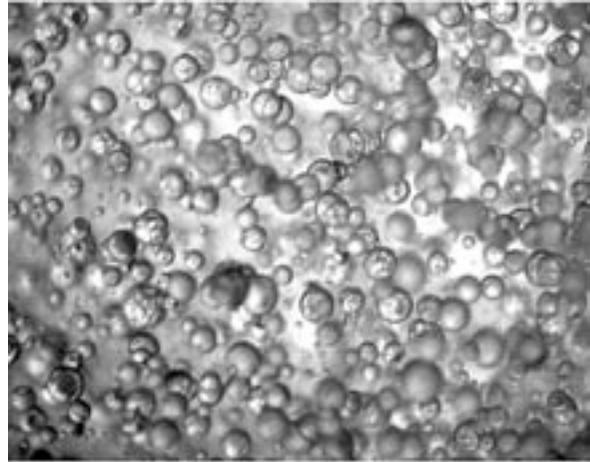


*Centro acuático olímpico en Beijing, China*

mezcla, también se le conoce como emulsión. Estas dispersiones se clasifican como directas, inversas ó múltiples. En las emulsiones directas la fase dispersa es una grasa o aceite y la fase continua, normalmente es agua. Algunos ejemplos son la leche, la mayonesa, varios tipos de pinturas, y otros productos alimentarios. En las emulsiones inversas, la fase dispersa, generalmente, es agua y la fase continua es grasa o aceite. Como ejemplos tenemos las margarinas y la mayoría de las cremas cosméticas. Las emulsiones múltiples contienen como fase dispersa, una emulsión inversa y como fase continua, un líquido acuoso, por lo que son ampliamente utilizadas en la industria farmacéutica para la elaboración de medicamentos de liberación retardada dentro del organismo.

Las espumas son dispersiones gas-líquido, en donde la fase dispersa es un gas y la fase continua es un líquido. La característica más importante es que las burbujas de gas son mucho más grandes que las gotas de las emulsiones. Además, las espumas se componen de capas delgadas que rodean las burbujas de gas, las cuales son opacas, sin brillo y tienen tendencia a agregarse fácilmente unas con otras.

En la vida cotidiana o a nivel industrial, las espumas pueden llegar a ser deseables o indeseables. Por ejemplo, los jabones, detergentes y “shampoos”, que producen mucha espuma, se consideran los más efectivos, mientras que en la industria química, de alimentos y farmacéutica generalmente se busca la forma de suprimir las espumas en los procesos, utilizando sustancias antiespumantes. En la industria alimentaria, las espumas se emplean para aumentar la solubilidad de las proteínas y favorecer su digestión. Asimismo, en otros procesos se promueve



*Visión microscópica de la dispersión de aceite dentro de un fermentador.*

su producción para eliminar las impurezas, como en el caso del tratamiento de aguas residuales o en la industria minera y en la petroquímica. La industria de los plásticos utiliza las espumas para fabricar materiales en los que el aire retenido en las burbujas sirve para formar una estructura determinada de antemano. Actualmente el uso de las espumas en la medicina, ha aumentado notablemente para el tratamiento de algunas enfermedades del sistema circulatorio, como la tromboflebitis, ya que las espumas proporcionan apoyo estructural y sirven para administrar medicamentos. Además, se usan como soportes en trasplantes y para el cultivo de tejidos.

Curiosamente, en los tejidos celulares, las espumas tienen estructuras en las que las burbujas dejan de ser esféricas y se convierten en poliédricas. Este tipo de estructura fue descubierto en 1993 en el *Trinity College* de Dublín, Irlanda, donde los físicos Denis Weaire y Robert Phelan lo observaron durante un estudio a nivel microscópico y analizando las imágenes obtenidas. Como dato interesante, la estructura utilizada como modelo para la construcción del edificio del Centro Acuático Olímpico en Beijing, China, en donde se celebró el Campeonato Mundial de Natación, así como los eventos acuáticos de la Olimpiada 2008, se basa en el concepto poliédrico de los tejidos celulares.

Las paredes y el techo de ese edificio están hechos de láminas transparentes sobrepuestas y selladas entre sí, reforzadas por una red de tubos de acero formando hexágonos y pentágonos irregulares con aristas de diferentes medidas y ángulos. Las paredes tienen un espesor de 3.6 metros y en el techo, el espesor es de 7.2 metros. El total de tubos de acero es de 22,000 y si se unieran por los extremos, alcanzarían una longitud de 90 kilómetros.

Puede parecer sorprendente que el arte y la estética se relacionen con estudios científicos, como en el caso de las espumas. Es indiscutible que la ciencia tiene una influencia muy importante en el desarrollo de la vida diaria. Sus expresiones encierran originalidad y muchas de ellas también belleza.



*Espuma de cerveza.*

# Ductos de combustibles

**Lorenzo Martínez Gómez**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos.  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Sólo tomamos conciencia de nuestras venas cuando nos cortamos, o cuando se tapan y nos da un infarto. No debería ser así. Habría que tener la conciencia de cuidar nuestro aparato circulatorio todos los días: el ejercicio, la comida sana, y el chequeo médico.

De la misma manera que la energía contenida en la sangre llega a nuestros tejidos transportada por las venas, nuestra sociedad se mueve debido a la energía que fluye a lo largo y ancho del país por un sistema circulatorio de decenas de miles de kilómetros de ductos de gas, gasolina, diesel y turbosina. Diariamente, muchos millones de litros de combustibles son llevados por ductos de los pozos petroleros a las refinerías, y de las refinerías a los grandes centros de consumo.

Aunque los principales centros urbanos e industriales están dotados de ductos, todavía se transportan muchos millones de litros por pipas o auto tanque. Por ejemplo, los cinco millones de litros diarios de combustibles que mueven la zona turística de Cancún todavía son llevados con pipas de combustible que peligrosamente recorren muchos cientos de kilómetros desde el muelle de Progreso en Mérida, o desde la refinería de Salina Cruz en Oaxaca. Aparte de obstruir el tráfico en las vialidades, las pipas de combustible representan un riesgo muy grande para los demás vehículos, la población o el medio ambiente. Los riesgos asociados a movilidad de la pipas y al factor humano en la conducción se reducen grandemente cuando el transporte de combustible se realiza por ductos, principalmente porque los ductos están fijos.

Actualmente, el transporte de combustibles y otros fluidos industriales por ductos es la opción más segura que tenemos. Esto no quiere decir que este riesgo sea cero: es solo un riesgo mucho más manejable que transportar los combustibles en pipas.



Científicamente el riesgo es una función de la probabilidad de una falla que se multiplica por la consecuencia de la falla. Generalmente el factor consecuencia es el que domina en los cálculos de riesgo. Por ejemplo, al medir el riesgo de explosión de un tanque de gas, el factor consecuencia que primero se considera es el daño a la vida de las personas. El factor consecuencia se reduce alejando al tanque de los lugares concurridos. Por el lado del factor probabilidad de falla, el riesgo se reduce con una operación cuidadosa del tanque, y desde luego dándole el debido mantenimiento.

La labor de mantener reducido el riesgo por el factor consecuencia tiene sus límites debido a que no siempre es posible mantener a los ductos alejados de la gente. Los derechos de vía de los ductos suelen ser invadidos por la presión del crecimiento urbano e industrial. Los derechos de vía que hace pocos años era espacios abiertos y respetados, hoy se encuentran rodeados de casas, cubiertos por vialidades e incluso instalaciones industriales. Las graves consecuencias previstas de las fallas o explosiones en estas zonas se han vuelto muy grandes, de manera que el único espacio libre para bajar el riesgo y hacerlo manejable es reducir al mínimo la probabilidad de falla.

Las causas más frecuentes de falla de los ductos son la corrosión y la acción desinformada, negligente, y/o criminal de terceros. Los accidentes causados por las acciones de terceros pueden ocurrir por la excavación sobre un ducto sin saber de su existencia, o durante o posterior a la acción criminal de robar el combustible. La corrosión exterior de los ductos ocurre por el contacto con el suelo, o los humedales, y la corrosión interior por el contacto con el agua residual que acompaña al combustible en su interior. Ambas formas de corrosión son causa frecuente de falla.

El avance científico reciente ha aportado muchos conocimientos dirigidos a reducir el riesgo de la operación de los ductos de combustible. Hay una cantidad enorme de contribuciones científicas para entender el riesgo, y calcularlo para darle un valor cuantitativo, incluyendo valor económico. La ciencia de materiales ha producido aleaciones de alta resistencia, formas de controlar la corrosión, formas para evaluar y predecir integridad mecánica, resistencia al esfuerzo y fractura. La reciente revolución científica de la ingeniería satelital ha aportado formas expeditas para localizar los ductos con muy alta precisión.

El gran reto del avance científico siempre ha sido proveer el conocimiento existente, y desarrollar conocimiento nuevo considerando las necesidades de

la sociedad. Los líderes del transporte de combustibles gradualmente se han inclinado por tomar una solución científica para reducir el riesgo asociado a los ductos. Típicamente las entidades donde los riesgos altos son inmanejables han sido las primeras en abordar científicamente el problema.

En México los operadores de gasoductos, de gasolinoductos y de turbosinoductos han lanzado importantes iniciativas para mitigar los riesgos. En el sector aeropuertos ASA ha optado por aplicar de manera sistemática avanzados sistemas de control de corrosión en las estaciones de combustible, y en los turbosinoductos en las plataformas de todos los aeropuertos para evitar accidentes asociados a las fugas o daños al ambiente.

En PEMEX se han desarrollado sistemas de información geográfica, control de corrosión y monitoreo, integridad mecánica y análisis de riesgo buscando una operación segura y confiable al transporte de gas, gasolina, turbosina y otros productos por ductos. Desde luego que la industria debe remontar el problema crecido que representa tener la mayoría de los ductos con 20 o 30 años de uso, y muchos años de restricciones de presupuesto de mantenimiento. En el contexto de una sociedad que reclama cada vez más seguridad para las personas y el entorno ecológico, se ha creado un ambiente que favorece mayor inversión

en mantenimiento, y contacto con el avance científico.

La primera y más efectiva contribución de la ciencia es siempre la transmisión del conocimiento. La capacitación de técnicos e ingenieros es fundamental para llevar el conocimiento actualizado, concentrado, accesible y de muy alta calidad a los técnicos e ingenieros. El entrenamiento especializado permite crear una base de lenguaje común para la comunicación entre técnicos e ingenieros, y para la aplicación de las estrategias avanzadas de mantenimiento de los ductos. Otra forma muy importante de transmisión del conocimiento son los congresos especializados.

La creación de conocimiento nuevo es muy necesaria para el campo de la operación continua y segura de los ductos. México tiene condiciones muy específicas en cuanto a la naturaleza de los hidrocarburos propios, así como los suelos, geografía y sociedad, los mares, las temperaturas y hasta los microorganismos que causan corrosión. Es en este entorno que debemos crear las soluciones, y toca a nuestra ciencia unirse a nuestra ingeniería para lograrlo.

Los principios del control de la corrosión se dicen rápido, pero de allí a saber lo que está pasando en el campo eléctrico formado por nuestra muy nutrida y compleja red de ductos, va a requerir estirar al máximo nuestros talentos.



# Historias y cosas de metales...

**Jorge Uruchurtu Chavarín**

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, CIICAP, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

**José M. Malo**

Instituto de Investigaciones Eléctricas

Cuando el comandante Robert Peary, descubridor del Polo Norte, estaba explorando Groenlandia en 1894, un esquimal lo llevó a un lugar cerca del cabo York donde encontró tres masas metálicas de meteoritos. Los esquimales las llamaban Saviksue o “los grandes hierros”; cada uno tenía un nombre sugerido por su forma. Peary removió los llamados “Mujer” y “El Perro” a su barco, en 1895, y los trasladó al Museo de Historia Natural en Estados Unidos. El meteorito más grande, “La Tienda”, fue el más difícil de remover pero, en 1897, Peary y sus hombres transfirieron la masa de 34 toneladas a su barco. Su hija de cuatro años, Marie Anhighito Peary, estrelló una botella de vino en el meteorito, el cual fue entonces renombrado como “Anhighito”. En 1904 fue arrastrado por la calle Broadway y la calle 77 en la ciudad de Nueva York, hacia la entrada del Museo Americano, siendo un gran acontecimiento. Cuando el Planetario Hayden fue abierto, “Anhighito” hizo su último viaje al primer piso del planetario, donde permanece desde entonces en exhibición. Los meteoritos consisten de una aleación de hierro con alrededor de ocho por ciento de níquel, más una pequeña cantidad de cobalto. Sin duda, el hombre primitivo pensaba que los meteoritos metálicos eran valiosos regalos enviados por los dioses. Hoy en día, sin embargo, los meteoritos difícilmente son considerados como una fuente útil de hierro. Por un lado, el servicio de entrega es errático y la llegada sin aviso sobre nuestras cabezas sería más vergonzosa que provechosa.

## ¿Pozos del Futuro?

Otro lugar donde el hierro se encuentra es el centro de la Tierra, el cual tiene un diámetro de alrededor de 6,500 km y consiste de hierro y níquel fundidos a una temperatura de 3,700 grados centígrados. Su extracción parece ahora imposible. Tal vez algún día pueda ser una fuente de metal que pueda ser extraído de la misma manera que el petróleo, a través de pozos. El cobre ha sido también descubierto ocasionalmente en forma metálica. La masa más grande de cobre puro fue encontrada en 1856 en lo que se llamó la Mina Minnesota, en la península Michigan, en Estados Unidos. Pesaba alrededor de 500 toneladas y era tan grande que tuvo que ser cortado en pedazos antes de ser llevado a la superficie. Tal hallazgo es, sin embargo, poco significativo como una fuente de

cobre, del cual son producidas en el mundo unas siete millones de toneladas al año.

## De los remotos orígenes

Históricamente, el hombre ha tenido que recurrir como fuente de suministro de los metales a la capa exterior de la Tierra. La mayoría de los metales de interés industrial se encuentran en la naturaleza como minerales, donde existen en combinación química con otros elementos. Estos minerales no se parecen a los metales que pueden ser extraídos de ellos. Uno difícilmente imagina que los duros y brillantes metales



puedan ser obtenidos a partir de pedruscos tan poco interesantes. La obtención de los metales por el hombre y el origen del fenómeno de corrosión están directamente ligados al origen de nuestro planeta.

La Tierra se condensó a partir de gas y polvo interestelar, hace unos 4600 millones de años. Sabemos, por los fósiles, que el origen de la vida se produjo poco después, hace quizá unos 4000 millones de años, en los lagos, lagunas y océanos de la Tierra primitiva. Asimismo, se han reportado grandes extinciones en la evolución de la Tierra. La de los dinosaurios es la más conocida. Sin embargo, la primera gran extinción debió ser por un ataque gaseoso. Como un microbiólogo explica, fue el peor caso de contaminación en la historia de la Tierra: ¿Qué era este desecho tóxico? ¿Qué era este gas que resultaba letal sobre muchas especies?

Paradójicamente fue lo que hoy sostiene toda la vida animal: el oxígeno. En una época, la atmósfera y los océanos de la Tierra estaban virtualmente libres de oxígeno y los organismos eran anaerobios. Otro gas, el bióxido de carbono, dominaba el planeta. Entonces, hace alrededor de 3000 millones de años, ciertas bacterias del caldo primario encontraron el tipo de fotosíntesis que libera oxígeno como producto de desecho. El oxígeno que nosotros inhalamos cotidianamente es para algunas especies un gas venenoso, agresivo y muy reactivo. Paraliza y quema a los organismos adaptados a la vida anaeróbica.

Con el oxígeno, una nueva especie aerobia pudo encontrar una forma de vida en la luz y obligó así a sus competidores a vivir bajo tierra o desaparecer. El desecho se acumuló. Los océanos fueron oxigenados y después los cielos. En el curso de esta proliferación de oxígeno, los metales que guardaban una pureza semejante a la de los meteoritos también se vieron contaminados, dando lugar a los minerales que hoy conocemos. Las superficies de otros planetas, como Marte, son testigos de una degradación parecida - rica en herrumbre y desprovista de vida-. Tal fue el veredicto de las misiones Viking I y Viking II. Aún cuando Marte pudo haber sido un planeta húmedo, la temperatura y presión atmosférica son ahora tan bajas que el agua puede existir sólo como vapor o hielo.

#### **Cuando el metal se degrada.**

La corrosión, por otro lado, es la degradación de un metal por su combinación con un elemento no metálico, tal como el oxígeno o el azufre. Generalmente esto significa el regreso del metal a la forma que existió: como un mineral, con la completa pérdida de sus propiedades mecánicas. Los minerales más abundantes son los óxidos, los sulfuros y los carbonatos, y mucha energía debe consumirse para convertir estos minerales en metal. La corrosión es el proceso inverso. No requiere de ese suministro de energía, de modo que la formación de sulfuros, óxidos, o carbonatos ocurre espontáneamente. De este modo



*Meteorito "Tent" o "Ahniohito"*



se entabla una guerra abierta entre el ser humano y la Naturaleza. El hombre trata de extraer el metal, y la naturaleza busca degradarlo.

Volviendo a la Tierra, aquellos materiales que son obtenidos más fácilmente de sus minerales y que requieren la menor energía en la extracción, son generalmente menos propensos a la corrosión, y aquellos que son obtenidos con mayor dificultad tienden a revertirse más rápidamente a su estado natural. Desde las épocas más tempranas, la metalurgia tuvo que ver con metales que se podían obtener más fácilmente, ya sea porque ocurrían naturalmente o sólo requerían de una extracción sencilla. La corrosión no era un gran problema como en tiempos recientes. El oro, el cual es encontrado en su estado metálico, no se corroe; y la plata, la cual se obtiene fácilmente, disfruta de una inmunidad similar. El cobre y el bronce se obtienen más fácilmente de sus minerales que el hierro y no sólo preceden al hierro cronológicamente, sino que tienen una mayor resistencia a la corrosión. Así, un elemento común a muchas culturas antiguas es el oro, usado como material ornamental. Esto puede verse tanto en Europa como en Asia, África, o América.

En la antigüedad, como en los tiempos modernos, las necesidades comerciales estimularon también con frecuencia las ansias de conquista, y el conocimiento de la tecnología de los metales era esencial para la supervivencia misma. Tenemos el ejemplo de los hititas de Asia Menor, el primero de los pueblos indoeuropeos que salió a la luz en la historia. Oponiendo armas de hierro a las de bronce, arrebataron

provincias enteras de los imperios de Mesopotamia y Egipto, y durante varios siglos, hacia mediados del segundo milenio antes de Cristo, erigieron el tercero de los grandes Estados civilizados que se extendía por el sur hasta Palestina y por el este hasta el Éufrates.

Otro caso es el de la cultura Espartana. Aún cuando los aceros de alta dureza conteniendo trece por ciento de manganeso no tuvieron amplio uso sino hasta 1882, hay evidencias de que en 1800 a.C. los espartanos tenían a su disposición yacimientos de hierro conteniendo manganeso, que les permitía hacer armas de mejor calidad que las de sus enemigos. Los chinos utilizaron el carbón mineral y luego el coque en la fundición de hierro, obteniendo un acero al carbón de alta calidad. Este acero fue utilizado por los persas y los árabes para hacer los famosos sables de Damasco.

Algunas aplicaciones metálicas permitieron una mejor calidad de vida. El elaborado sistema de distribución de agua hizo necesario obtener grandes cantidades de plomo. Bretaña era su principal fuente de suministro. Para recubrir los baños romanos, el metal era fundido en gruesas hojas. Tuberías de agua de tres metros de longitud eran hechas doblando una hoja sobre una barra, de tal modo que se producía una forma de tubo y la unión era sellada con soldadura o con plomo. Los romanos debieron entender que el plomo tiene una buena resistencia al ataque por agua: algunas de las tuberías de plomo hechas hace 1200 años han sido excavadas en Pompeya, Roma y Bath y se conservan en muy buenas condiciones. El agua, que debió contener altas concentraciones de plomo en solución, sería responsable de la decadencia del imperio romano por la acumulación en el cerebro y envenenamiento por plomo de sus habitantes, ejército y dirigentes; de acuerdo a algunas sugerencias. La palabra latina para plomo es plumbum y los artesanos que trabajaban este metal eran llamados plumbarii, denominación que no es lejana a nuestro castellano plomero. La combinación de su bajo punto de fusión (327 grados centígrados) y su poca dureza, hicieron que los antiguos consideraran al plomo como el menos noble de los metales. Sin embargo, a pesar de su clasificación baja en la familia de los metales, el plomo era utilizado para el acuñamiento de monedas en tiempos antiguos, porque era fácil de fundir y porque resistía a la corrosión. Pero eso será otra historia.



# Impacto de la corrosión

**Jorge Uruchurtu Chavarín**

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, CIICAP, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

La corrosión es una palabra que comúnmente evoca y se asocia con la herrumbre, producto de la degradación de los metales ferrosos. La corrosión es un fenómeno de deterioro de las propiedades de un metal provocado por el medio ambiente ya sea natural o artificial. Tiene un impacto sobre los ecosistemas dado que, por ejemplo, una falla debida a la corrosión interna y externa en las tuberías puede provocar pérdidas del fluido que transporta y por tanto fuga de contaminantes al ambiente. Aparte del costo inherente a la sustitución del tramo de tubería dañado se tiene que tomar en cuenta la pérdida del producto, la contaminación del terreno y el paro forzado de la refinera o del centro de abastecimiento del producto transportado y la suspensión del servicio.

Las pérdidas asociadas a este fenómeno pueden ser económicas, sociales, y en muchos casos humanas. El accidente de Guadalajara, donde hubo explosiones debidas a fuga de gasolina y el derrumbe de algunos edificios durante los temblores de 1985 en la Ciudad de México, bastan como ejemplos para ilustrar la anterior aseveración. Se ha calculado que los costos por corrosión son del orden del tres a seis por ciento del producto nacional bruto de un país. De estos costos, el 40 por ciento pueden ser evitados con la

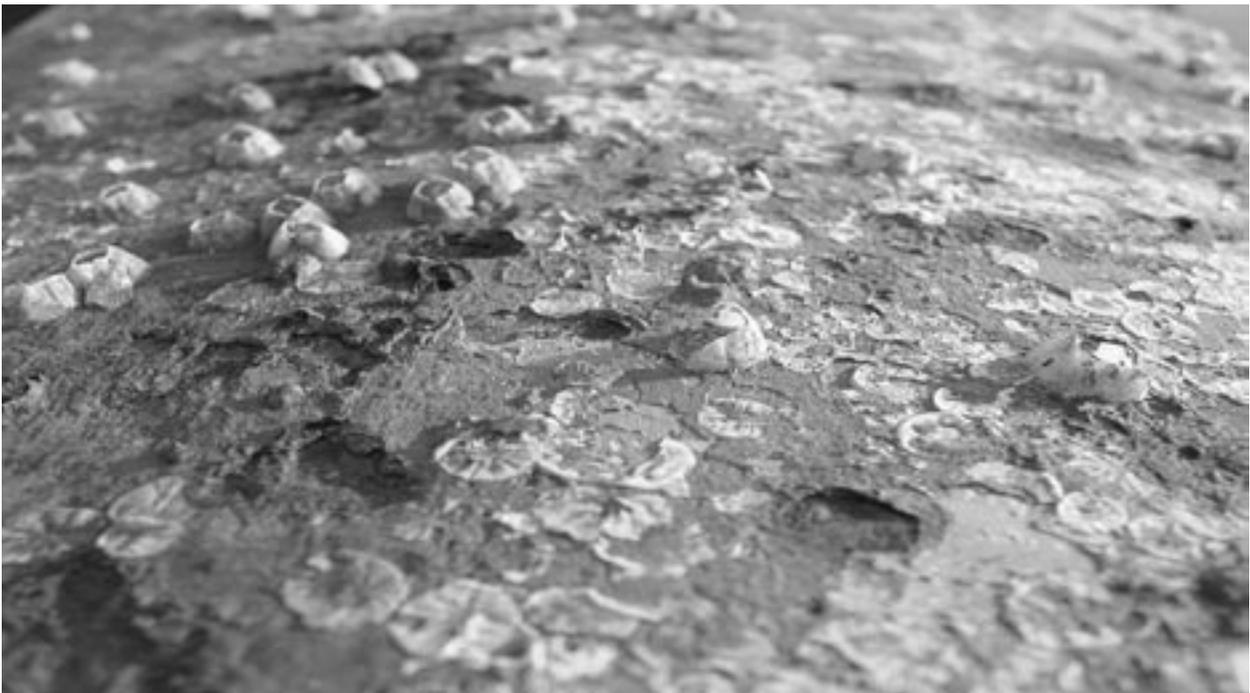
tecnología disponible en la actualidad. Esto habla de ineficiencias, desperdicio y falla de mantenimiento en las plantas y procesos, que se traducen en aumentos a los costos de los bienes y servicios que se producen, siendo con esto menos competitivos.

## ¿Qué es la corrosión?

En el más amplio sentido, la corrosión es la degradación de los materiales por efecto de la interacción con el ambiente que lo rodea para adoptar estados en la naturaleza. Esto sucede, por ejemplo, en polímeros, como los plásticos, expuestos a solventes, piedras calizas expuestas a lluvia ácida, y metales en contacto con soluciones acuosas, como los aceros expuestos al agua de mar.

Los materiales metálicos se encuentran en la naturaleza en forma de óxidos y sales, y el hombre, mediante el uso de grandes cantidades de energía, los transforma en materiales para uso tecnológico como por ejemplo: hierro, cinc, cobre y aluminio. Por lo tanto, la corrosión es un reclamo de la naturaleza al hombre; ésta trata de recuperar los materiales por él manufacturados y regresarlos a su estado inicial.

La corrosión de los metales es una oxidación del



*Oxidación del metal.*



material, la cual puede ocurrir por el contacto con un medio acuoso que contiene sales, conociéndose a este fenómeno como corrosión acuosa o electroquímica. La corrosión electroquímica consiste en reacciones químicas sobre la superficie del metal que se llevan a cabo debido a la formación natural del equivalente a pilas eléctricas sobre la superficie metálica, las cuales producen corrientes eléctricas. La velocidad del proceso corrosivo depende de una reacción de oxidación o disolución metálica y otra reacción de reducción o de formación de productos de corrosión, como sales y óxidos metálicos, la cual es llamada herrumbre en el caso del hierro.

La pérdida debido a la corrosión metálica puede ser de manera generalizada a lo largo y ancho de la superficie, o bien de forma localizada. De éstas, la segunda es más perjudicial, ya que no involucra una gran pérdida de material, pero puede dejar al material inservible sin que éste cumpla su periodo de vida útil.

### **Control de la corrosión**

Las técnicas de control de la corrosión se basan en tres estrategias:

- 1) Uso de materiales mejores y más resistentes a la corrosión.
- 2) La alteración del medio a través del uso de químicos o inhibidores de la corrosión.
- 3) Uso de barreras físicas entre el metal y el medio, como pinturas o recubrimientos, o bien la modificación de las características eléctricas de la superficie del metal.

Desde el punto de vista de la ingeniería todos los problemas de corrosión, aunque no plenamente bien

entendidos, se pueden controlar aplicando una o una combinación de estas técnicas.

La manera tradicional de medir la velocidad de corrosión consiste en la medición de la pérdida de metal que sufre el material en un periodo de tiempo. Sin embargo, debido a que en el fenómeno se involucran corrientes eléctricas, es posible también utilizar instrumentos electrónicos que permiten evaluar la corrosión de manera instantánea.

### **Ciencia y Tecnología**

Para la introducción de los materiales metálicos a los procesos de manufactura se requiere determinar su comportamiento antes de exponerlos a los ambientes de operación y servicio. Desgraciadamente, muchas veces esto no sucede, ya que sus propiedades de resistencia a la corrosión y estabilidad química sólo se empiezan a estudiar una vez que ocurren fallas en su operación.

Los sistemas que forman la infraestructura de un país como puentes, carreteras, muelles, presas, líneas de ferrocarril, líneas de transmisión, etc., que han sido construidos con aceros y concretos, en muchos casos se están acercando al límite de su vida útil por lo cual representan ya riesgos, como se demostró durante los sismos de 1985 en México.

Como un buen ejemplo del potencial impacto económico de la corrosión, se estima que los costos asociados a la reparación de puentes de concreto en los Estados Unidos son de alrededor de 90 mil millones de dólares. Esto nos puede dar una idea de los costos asociados con la corrosión metálica en nuestro país y por qué es importante controlarla.



# **LA CIENCIA ES FÍSICA Y SI NO...**





# Prólogo

Imaginen que una pareja lleva a su niño al parque el fin de semana. El niño pisa sin cuidado unas matas de flores, toma una piedra y la lanza hacia el frente. Si queremos discutir la necesidad de espacios de recreación en una ciudad recurrimos a la sociología y seguramente también a la ciencia política. Si lo que nos interesa son los motivos del niño para lanzar piedras hablaremos con un psicólogo. Si la pregunta es ¿qué le pasó a las flores? recurrimos a la biología. Para el médico lo interesante es qué músculos del brazo movió el niño. Si queremos conocer la composición de la piedra buscaremos a un químico. Para un físico clásico, los motivos del niño no son relevantes, ni sobre qué está parado, ni tampoco la importancia de que una ciudad tenga espacios verdes, ni que el niño tiene brazo. Simplemente considerará a la piedra como un punto y calculará la trayectoria parabólica de la piedra en movimiento, sabiendo que es la fuerza de gravedad la que hace que la piedra caiga. Hay dos comentarios a esta pequeña historia. La realidad no está dividida en disciplinas, están todos los factores juntos, pero a nosotros nos ayuda fragmentarla para estudiarla. El segundo comentario, es que la física es la más sencilla (contrariamente a lo que se piensa popularmente) de las disciplinas pues ni trata con seres vivos ni con problemas sociales.

Cuando nos referimos al mundo atómico, la frontera entre la física, la química y la biología no es tan clara como en el mundo macroscópico. Ahí, donde reina la mecánica cuántica, los átomos tienen comportamientos sorprendentes, que afectan tanto a las propiedades que solemos llamar físicas, como a las químicas, como a las biológicas. En lo que se refiere a la ciencia experimental, los laboratorios modernos de física, de química, de biología, de arqueología, de paleontología, de medicina, tienen básicamente los mismos equipos experimentales que han permitido penetrar en la materia y arrojado información que cada disciplina aprovecha de manera diferente. Una vez más nos damos cuenta de la necesidad de algo que podemos llamar la “unificación del conocimiento”, que en su más amplia expresión, debe de incluir a las humanidades, desde luego.

Cada vez más la ciencia se enfrenta con problemas que requieren justamente de una visión más integradora y complementaria. Esto es muy claro en los sistemas complejos donde las partes cooperan entre sí. La complejidad no radica en la cantidad de componentes sociales, ecológicas, físicas o económicas que están involucradas, sino que se

caracteriza por fronteras tenues y sobrepuestas entre sus partes y fundamentalmente por las interacciones entre ellas que pueden ser más importantes que las propias componentes y dan lugar a los llamados comportamientos emergentes. La suma aporta más que la unión directa de las partes.

Sin embargo, para propósitos de este libro, vamos a hacer una división convencional, por disciplinas. La física es una ciencia natural que trata acerca del estudio de la materia y su movimiento en el espacio y en el tiempo, y todo lo que se deriva de ello, como la fuerza y la energía. Su objetivo es entender cómo se comportan el universo y el mundo a través del análisis general de la naturaleza. El lector encontrará en la sección de Física una gran variedad de temas que van desde la termodinámica y la mecánica estadística hasta el electromagnetismo, la mecánica cuántica y la relatividad. También, muchas aplicaciones de la física en ciencia de materiales, en nanotecnología, en biofísica y en astronomía. Además, caos, fluidos y complejidad así como ejemplos muy específicos sobre sonidos, experimentos con peines y resortes, fenómenos naturales, seguridad al manejar, el láser y aplicaciones de la energía solar.

Es famosa la frase de Ernest Rutherford, descubridor del núcleo atómico, quien dijo “la ciencia es física o si no, es una colección de estampillas” y en castigo recibió el premio Nobel de química en 1908. La verdad es que los físicos sí somos un poco presumidos respecto a la metodología precisa que se maneja en nuestra disciplina. Ciertamente, no hay ninguna otra que tenga la estructura matemática y la capacidad predictiva que tiene la física. Claro que el motivo es simple, ya lo dijimos al principio, la física estudia los fenómenos más sencillos de la naturaleza. No hay forma de comparar la sencillez del movimiento de un péndulo con la complejidad de una célula. Los fenómenos relacionados con la vida y con la sociedad tienen muchos parámetros y elementos inesperados. En cambio en física, los seres inanimados pueden describirse muy bien con modelos aproximados, según la propiedad física que se quiera estudiar.

Invitamos a nuestros lectores a disfrutar estos textos y completamos la frase del título: “La ciencia es física y si no...es química, biología, matemáticas, o multidisciplinaria, y seguro es siempre interesante”.

Julia Tagüeña



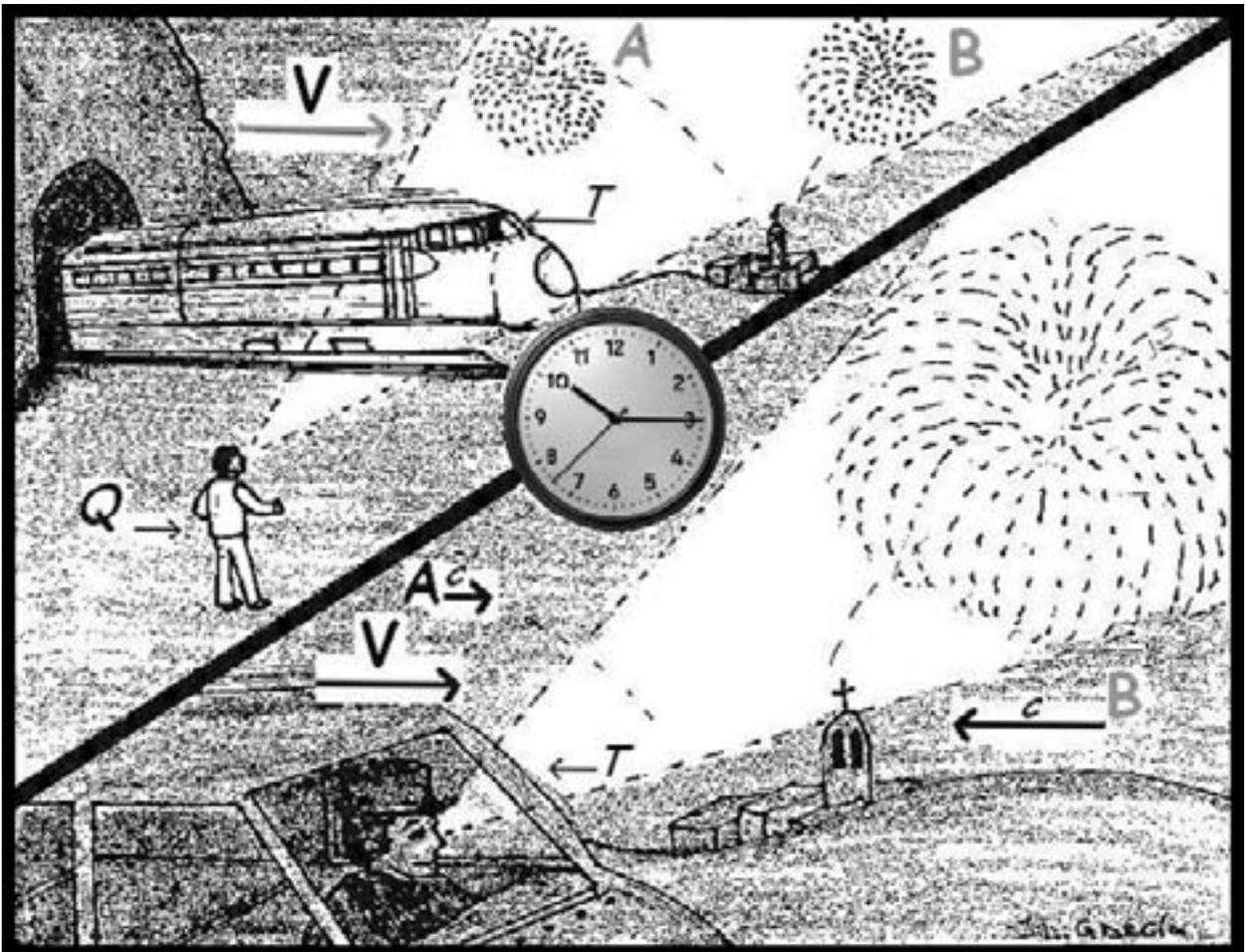
# Einstein, la relatividad especial y la sincronización de relojes

**Alejandro Ramírez Solís**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Einstein es, sin duda alguna, el científico más famoso del planeta. Sin embargo, pocos saben cuándo y por qué se volvió tan famoso. En realidad, su fama surge por dos razones básicas. La primera es que desarrolló, él solo y de manera independiente, una nueva teoría física que revolucionó la forma de pensar acerca del espacio y del tiempo. La segunda es que Einstein hizo una predicción teórica realmente extraordinaria: la luz por ser energía, siendo equivalente a la masa por su famosa ecuación  $E=mc^2$ , también está sujeta a los efectos gravitacionales y viajará doblándose en el espacio cerca de un objeto muy masivo, como el Sol. La predicción, hecha en 1917, resultó ser confirmada experimentalmente

4 años más tarde cuando se midió la posición de algunas estrellas durante un eclipse solar. Esta confirmación experimental lanzó la genialidad de Einstein al mundo cuando el resultado fue publicado en primera plana en los periódicos de Londres y Nueva York. Para dar al César lo que es del César debemos enfatizar que, en realidad, la predicción de Einstein fue basada en una sugerencia explícita del genio matemático Schwarzschild, que le envió desde las trincheras durante la primera guerra mundial, carta que posteriormente Einstein reconoció haber recibido. Por otro lado, aunque abordaremos en otra entrega la famosa confirmación experimental de la predicción de Einstein, podemos adelantar que



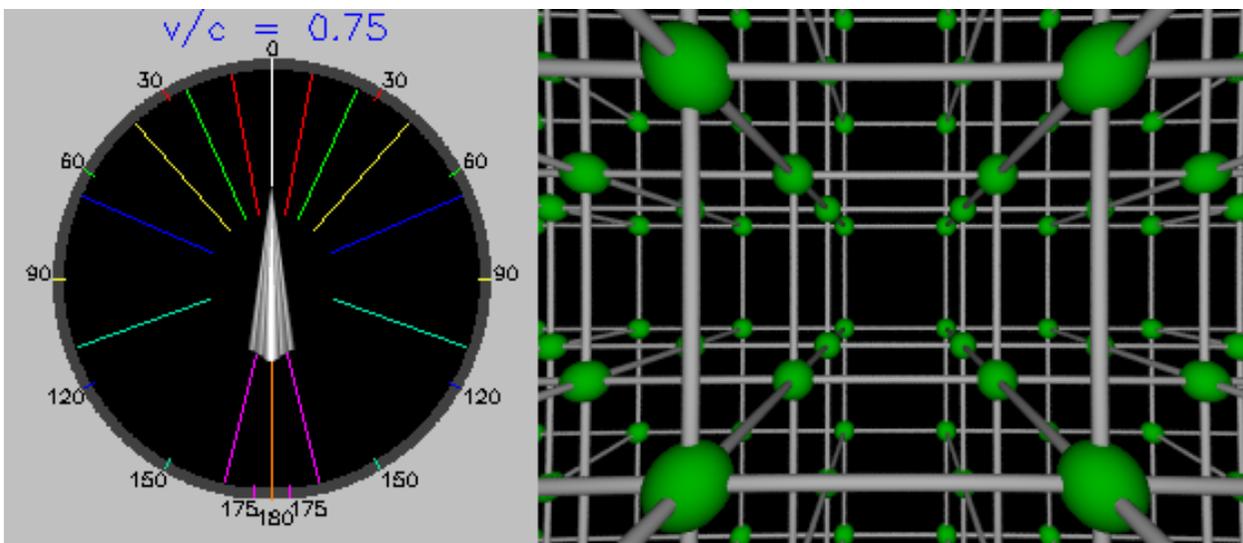
El problema de la sincronización de relojes en dos sitios distantes (ver texto).

debido a limitaciones en los aparatos de medición de la época, las mediciones tenían algunos errores que afortunadamente no fueron puestos en evidencia en su momento, ya que ahora sabemos que en realidad la teoría hizo las predicciones correctas de lo que debió haberse medido en el experimento realizado por Sir Arthur Eddington durante el eclipse solar total en África.

En esta entrega abordaremos, de manera bastante breve dado el espacio disponible, únicamente algunas de las ideas básicas de la primera versión de la Teoría de la Relatividad, la Relatividad Especial, que describe fenómenos físicos desde sistemas de referencia diferentes no acelerados, es decir, que se mueven con velocidad constante uno con respecto al otro. La segunda versión que abordaremos después, siendo mucho más compleja y avanzada, involucra sistemas de referencia acelerados y hace desaparecer el concepto de “fuerza de gravedad” a cambio de introducir una “curvatura” en el continuo del espacio-tiempo.

La Relatividad Especial fue planteada por Einstein en 1905 en un artículo que no causó gran sensación en esa época. Las razones del poco impacto entonces son comprensibles: nada más ni nada menos, proponía un replanteamiento completamente nuevo de los conceptos fundamentales del espacio y del tiempo, haciendo desaparecer la noción Galileana y Newtoniana de que es posible medir el espacio de manera independiente del tiempo. Para hacer más notable la hazaña de Einstein notemos que, aún hoy en día, nos parece absolutamente lógico que podamos medir la longitud de un lápiz, de un edificio o de una mesa sin importar si estamos en reposo o sobre un auto o un avión en movimiento. Pero entonces, ¿cómo es posible que Einstein haya descubierto que en realidad la longitud de los objetos y los intervalos de tiempo dependen del sistema de referencia que

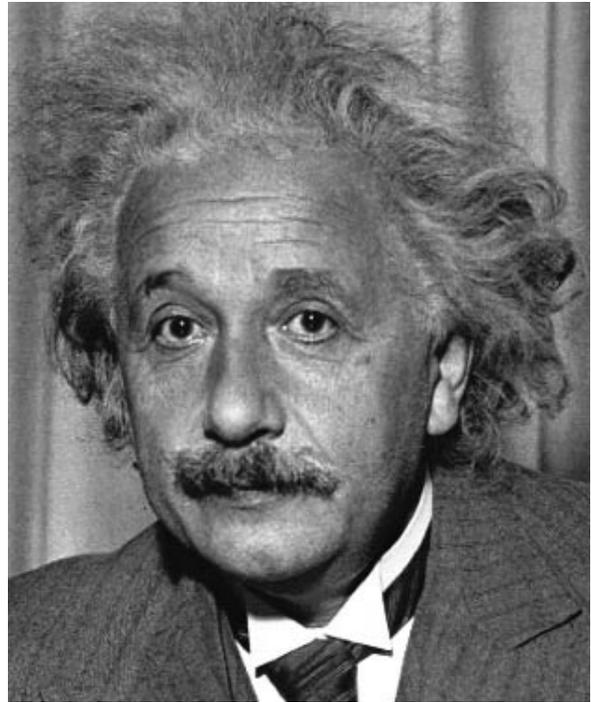
usemos para medirlos? La historia hace aparecer varias circunstancias especiales que llevaron a Einstein a cuestionar ideas que parecían “absolutamente lógicas” y a plantear lo que él llamó *Gedankenexperiment*, o “experimentos del pensamiento”. Algunas de esas circunstancias especiales que llevaron a Einstein a plantear estos “Gedankenexperiment” es que, a) desde que tenía 16 años trabajó en la compañía de generación de electricidad que tenían su tío y su padre, con lo cual tenía una mentalidad de aplicación práctica de sus conocimientos teóricos, b) que conocía bien los fundamentos del electromagnetismo y c) que trabajó en una oficina de patentes en Berna (Suiza) en donde recibía y evaluaba solicitudes de aplicaciones prácticas a dispositivos electromagnéticos que permitían sincronizar a dos de estos aparatos en lugares diferentes. Einstein mismo cita una circunstancia histórica particular: justo en esa época la red ferroviaria de Europa comenzaba a desarrollarse y, para su correcto funcionamiento, era crucial sincronizar los relojes de las estaciones de tren en lugares distantes más de 100 km. Estos mecanismos de sincronización involucraban el envío de señales electromagnéticas a lo largo de los cables del telégrafo entre dos ciudades. El problema de la sincronización de relojes en dos sitios distantes fue lo que llevó a Einstein a plantear el primero de sus “Gedankenexperiment”. Podemos exponerlo brevemente aquí (ver también figura anexa). Supongamos que dos amigos deciden verificar si un par de eventos son simultáneos o no, estando uno de ellos (A) parado en el andén de la estación de tren y el otro (B) sobre un tren que corre a 100 km/h a la derecha. El experimento es tal que cuando el observador A percibe SIMULTÁNEAMENTE un par de luces en el cielo, una a 10 km a la derecha y otra 10 km a la izquierda provenientes de fuegos artificiales, el observador B se encuentra en el tren pasando, de izquierda a derecha, por la estación



La figura muestra lo que un observador ve cuando viaja a 3/4 de la velocidad de la luz. Por ejemplo, los objetos que se encontraban directamente a la derecha y la izquierda (90°) del observador en reposo, ahora aparecen a menos de 45°.

justo en frente de A cuando éste percibe ambas luces simultáneamente. La pregunta crucial que Einstein se planteó, cuya respuesta ahora nos parece obvia, es si para el observador B los fuegos artificiales también parecieron ser simultáneos o no. Dejo al lector el tiempo de reflexionar sobre la cuestión unos minutos. Un simple análisis da la respuesta correcta: no los percibe simultáneamente, ya que para el observador B el fuego artificial de la derecha parece haber explotado ANTES que el de la izquierda. La razón es que el tren iba corriendo de izquierda a derecha y que, por lo tanto, el tren se acercaba velozmente a la luz de la explosión en la derecha, mientras que la luz de la explosión de la izquierda tomó más tiempo en alcanzar al tren que huía de ella.

Esto evidentemente introduce un problema grave: es absolutamente imposible sincronizar un par de relojes que se encuentren en lugares distintos si no se cuenta con un tercer elemento a distancias conocidas y capaz de enviar una señal visible para ambos relojes. Esta condición, obviamente, es muy difícil de satisfacer en la mayoría de los casos. Para concluir esta sección, observemos que la velocidad de la luz es muy grande (300,000 km por segundo) por lo que, para efectos de la vida diaria, la sincronización de relojes a menos de una parte en 1,000 (es decir, relojes que se encuentren separados una distancia tal que la luz tarde más o menos 0.001 segundos en llegar de uno al otro) es fácil. Cuando se trata de la sincronización precisa de relojes de referencia, ésta se lleva a cabo bajo condiciones mucho más estrictas y con dispositivos capaces de oscilar miles de millones de veces por segundo, con lo cual la sincronización se logra llevar a más o menos algunos ciclos del oscilador. Para estos casos se usan sistemas atómicos en condiciones ultra-controladas de pureza, presión y temperatura. Los relojes atómicos modernos usan las señales de microondas que los átomos emiten cuando sus electrones cambian de niveles de energía (ver la contribución “Qué significa la palabra Cuántico” de La Unión de Morelos, [http://www.acmor.org.mx/descargas/nov12\\_cuantico.pdf](http://www.acmor.org.mx/descargas/nov12_cuantico.pdf)). En la actualidad los relojes más precisos usan átomos ultra-fríos a temperaturas de micro-Kelvin



(menores que  $-273$  grados centígrados) en lo que se conoce como “fuentes atómicas”. La precisión de estos relojes es de  $\pm 0.0000000001$  segundos por día, pero en Suiza se construyó en 2004 un reloj capaz de no adelantarse o retrasarse más de un segundo cada 30 millones años, usando átomos de cesio en una fuente atómica. Entre otros usos, estos relojes de referencia se usan para controlar los sistemas de posicionamiento global (conocido como GPS) que usan los aviones, barcos y autos para orientarse, así como para controlar las emisiones de TV y de comunicaciones por satélite alrededor del mundo. Para concluir, es interesante notar que Einstein fue el padre de una teoría que trata con fenómenos físicos que no podemos percibir en la vida diaria (y que en cierta forma parecieran ir en contra del sentido común), pero su formulación estuvo en parte motivada por problemas prácticos de su época.



# De los materiales conductores, aislantes y semi-conductores a la ley de Moore de las computadoras

**Alejandro Ramírez Solís**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

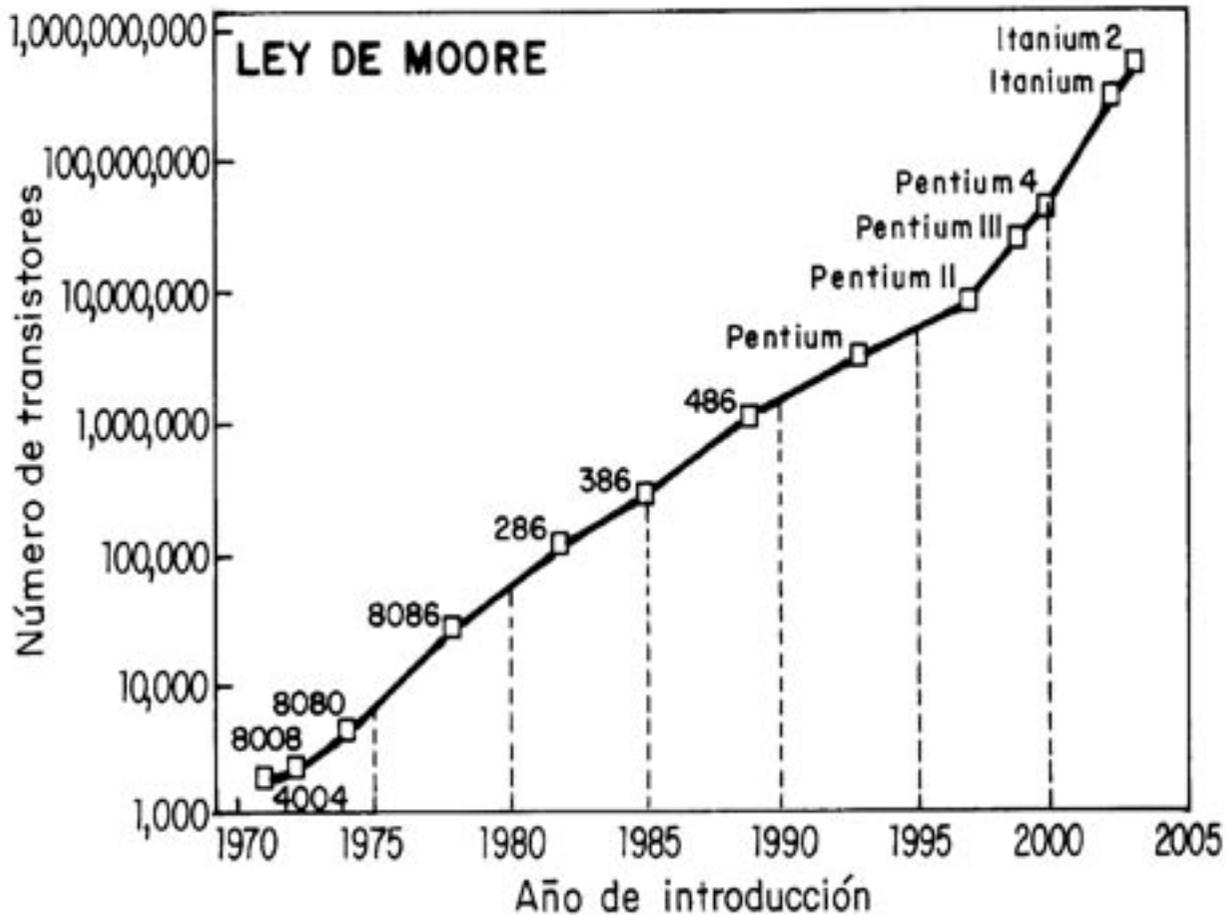
Es del conocimiento común que los materiales pueden clasificarse por su comportamiento cuando son sujetos a una diferencia de potencial eléctrico, también llamado voltaje. Todo mundo sabe que para cambiar un fusible es mejor usar guantes o pinzas aisladas con plástico o hule. Esto se debe a que, *grosso modo*, los materiales pueden ser buenos (algunos excelentes) conductores de la corriente eléctrica o ser malos conductores; en este último caso se llaman materiales aislantes. Los primeros son generalmente metales, como el cobre, la plata y el oro, mientras que los aislantes generalmente son no metales, como el aire, el carbón o los materiales hechos de derivados de éste, como los plásticos y hules. Sin embargo, existe una sutileza. No hemos especificado cuál es la diferencia de potencial (el voltaje) aplicado a ambos lados del material. Si aplicamos un voltaje suficientemente alto (digamos de miles de volts) aun los materiales aislantes se vuelven conductores por un fenómeno que se conoce como la “ruptura eléctrica”. Esta ruptura ocurre a diferentes valores de voltaje para cada material aislante y, para el aire, ésta ocurre cuando la diferencia de voltaje entre dos puntos situados a un metro alcanza los 300,000 volts. Este valor es de especial importancia por dos razones prácticas. Primeramente, es el voltaje que puede alcanzarse en la atmósfera cuando las moléculas de agua que suben con el aire caliente rozan las que bajan con el aire frío despojándolas de electrones; esto produce una separación de cargas positivas y negativas (cationes y aniones de agua) que se acumula en los extremos superior e inferior de las nubes. Esta acumulación continúa hasta que el voltaje entre dos puntos del aire alcanza los 300,000 volts/m y entonces ocurre una descarga eléctrica que regresa los electrones en exceso de los aniones hacia los iones positivos que habían sido formados previamente: esto es la esencia y el nacimiento de un rayo. La segunda razón tiene su origen en el uso tecnológico de este valor del voltaje de ruptura del aire en los motores de combustión interna. En efecto, los motores requieren para funcionar de la ignición de la mezcla combustible-aire y ésta se logra gracias a la chispa que salta entre los dos electrodos de una bujía. La distancia que separa estos electrodos está

perfectamente calibrada (2-3 mm) para que la chispa surja cuando la señal eléctrica enviada a la bujía tenga el voltaje necesario para lograr la ruptura eléctrica de la mezcla mencionada.

Ya vimos que la conducción o falta de conducción de electricidad por un material es un asunto que depende del voltaje aplicado a él. En general, en las aplicaciones de la vida diaria estamos limitados a voltajes menores o iguales al que nos entrega el proveedor de energía eléctrica, y casi siempre (en América) se trata de 110 volts. En realidad, las aplicaciones más comunes en la actualidad usan voltajes mucho menores a éste, del orden de 3 a 15 volts. Para esto basta ver cuáles son los voltajes con los que operan los dispositivos electrónicos más comunes como teléfonos celulares, laptops, iPods, cámaras digitales, etc. Entonces la definición de conductor o aislante se vuelve mucho más restringida y estricta. Estamos hablando ahora de materiales que conducen la electricidad con voltajes bajos. Aquí es donde aparecen los semi-conductores, que son precisamente aquellos que conducen la corriente eléctrica cuando el voltaje es bajo, digamos entre 1 y 6 volts. No son conductores, porque un conductor permite el paso de corriente con un voltaje miles de veces menor, pero tampoco son aislantes pues se requiere de un voltaje no demasiado alto para que se conviertan en conductores, comparado con el que requieren los aislantes comunes.

El uso de bajos voltajes con bajas corrientes tiene múltiples ventajas, pero las más notables son que los dispositivos consumen menos energía por unidad de tiempo de operación y se calientan menos, con lo cual la disipación de energía es menor, por lo que son más eficientes.

Los dispositivos basados en semiconductores fueron diseñados porque con ellos es posible la construcción de interruptores o switches electrónicos, llamados transistores, que son mucho más rápidos (cambian de estado encendido/apagado a mayor frecuencia), además que son mucho más pequeños y eficientes que los antiguos bulbos o “lámparas-switch” que solían usarse para esta función. Es muy probable que la mayoría de los lectores ya no hayan tenido la



oportunidad de ver un radio o una televisión hecha con bulbos, ya que la tecnología de los transistores invadió masivamente el diseño de los aparatos electrónicos desde inicios de los años 1970. Esas TV de bulbos eran muy pesadas, consumían cantidades enormes de corriente eléctrica además de calentarse tanto, que a veces era necesario apagarlas para permitir que se enfriaran después de operar pocas horas. Los bulbos fueron rápidamente abandonados por la introducción de los circuitos integrados (o microchips) a principios de los años 70.

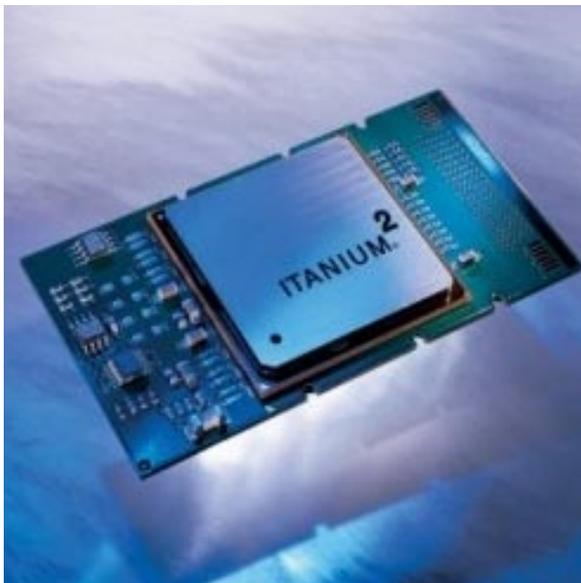
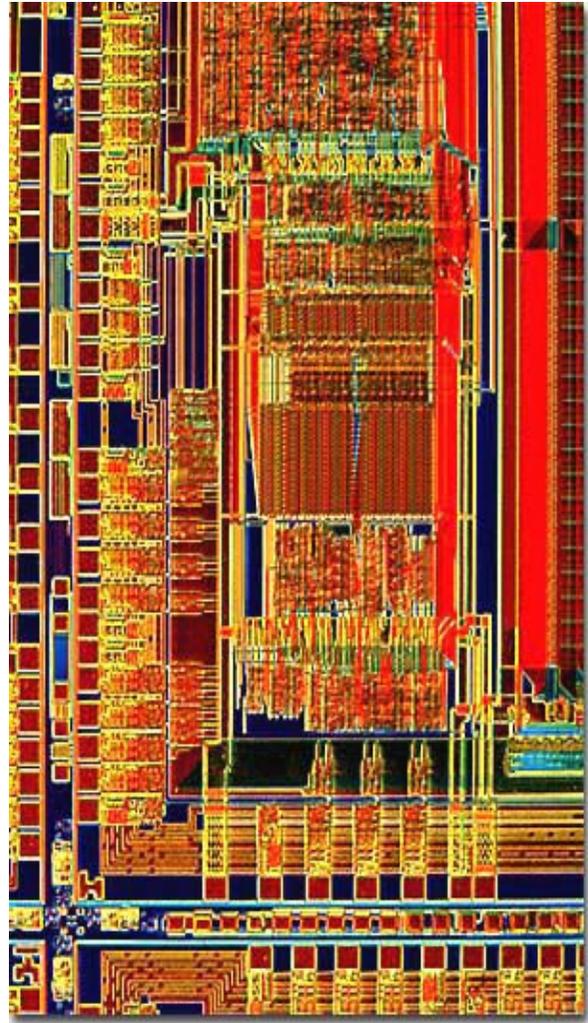
Los materiales de los cuales están hechos todos los dispositivos electrónicos de hoy en día contienen principalmente tres o cuatro tipos de materiales semiconductores: silicio, germanio, y mezclas de galio y arsénico. La ventaja tecnológica que ofrecen estos materiales sobre los anteriores son muchas, una de las cuales es crucial: la altísima cantidad de transistores que es posible colocar en una superficie de 5 cm<sup>2</sup>.

El año de 1958 marcó el inicio de la construcción de microchips cuando se logró integrar una centena de transistores en un solo chip. Desde entonces la evolución en la densidad que es posible lograr por chip ha sido realmente sorprendente. En 1971 era posible integrar 2300 transistores por pulgada

cuadrada, en 1980 era de 50000, en 1990 era de 1,100,000, en el año 2000 era de 30 millones y en 2008 era ya de ¡ 2000 millones de transistores por chip !. Variedades múltiples de estos chips están por todos lados, desde la laptop que puede comprarse en el supermercado, en el teléfono celular o el iPod que usamos todos los días, hasta la cámara digital que cuesta \$1500 pesos y tiene una resolución de 12 Megapixels ¿Puede el lector imaginarse el tamaño que debe tener un solo transistor para poder colocar 2 mil millones de ellos en una superficie de sólo 6.2 cm<sup>2</sup>? Evidentemente, estos avances sorprendentes han sido posibles gracias a innovaciones en la tecnología de fabricación que permiten manejar materiales con extrema precisión, actualmente ya a escala de decenas de nanómetros (1 nanómetro es igual a una millonésima parte de un milímetro). Aquí hay que hacer notar que en 1965 Gordon Moore (co-fundador de la empresa Intel) predijo que, manteniendo el costo mínimo de producción por cada transistor, el número de transistores por chip se duplicaría cada 18 meses. La gráfica muestra la evolución real que ha ocurrido en los últimos 40 años y el período de duplicación corresponde más precisamente a 20 meses; es crucial notar que el eje vertical está en escala logarítmica

(esta escala usa potencias de 10 en vez de unidades a intervalos regulares). Existen también otras formulaciones similares a la llamada Ley de Moore que verifican el crecimiento exponencial con el tiempo de, por ejemplo, el número de transistores por circuito integrado, la densidad de transistores a costo mínimo por transistor, el costo por transistor (en este caso se trata de decrecimiento exponencial), el poder de cómputo (en millones de operaciones por segundo) por unidad de costo, el tamaño de los discos duros (memoria medida en Megabytes) a costo fijo, o el tamaño de la unidad de memoria interna de acceso aleatorio (RAM) a costo fijo.

La ley de Moore ha seguido vigente hasta la fecha (2010) y algunos expertos de Intel predijeron en 2005 que seguirá vigente hasta el año 2015. Sin embargo, estamos llegando a un impasse práctico porque los procesadores más rápidos y con mayor número de transistores se calientan más. La velocidad de un procesador se mide usualmente en unidades de frecuencia como GigaHertz (1 GHz representa mil millones de ciclos por segundo), a pesar de ser una medida algo simplista que no toma en cuenta la arquitectura detallada de cada procesador. El lector avezado habrá notado que la velocidad de los procesadores en los últimos tres años ha permanecido prácticamente constante, en cuyo caso cabría preguntarse si realmente la Ley de Moore sigue vigente. En realidad la respuesta a la pregunta tiene que ver con el conflicto que existe entre la rapidez (como ya vimos, ligada al problema de la generación de calor por los procesadores más rápidos) y la comodidad de los usuarios. Como el público no quiere andar cargando con un ventilador o una bomba de agua para enfriar sus computadoras, desde el año 2007 los fabricantes de computadoras personales y laptops prefieren mantener sus procesadores operando alrededor de los 2-3 Gigahertz a cambio de modificar



la arquitectura y ofrecer al usuario mayor poder de cómputo a través de procesamiento en paralelo con los populares “núcleos múltiples”, conocidos como Dual-Core o Quad-Core, actuando como si la computadora tuviera dos o cuatro procesadores. Por otro lado, existen algunos avances notables que usan tecnologías radicalmente diferentes que podrían extender la validez de la Ley de Moore más allá del año 2025, como por ejemplo, el transistor desarrollado por IBM y el Instituto Tecnológico de Georgia, hecho a base de silicio/germanio capaz de cambiar de estado a la vertiginosa velocidad de 500 GHz (¡quinientas mil millones de veces por segundo!). Desafortunadamente esta hazaña requiere que el transistor (uno solo, por el momento) se mantenga a la bajísima temperatura de 4.5 grados Kelvin, es decir a -268 grados centígrados. A pesar de algunas limitaciones en la actualidad, múltiples grupos de investigadores, tanto académicos como en empresas privadas, trabajan para mantener la Ley de Moore viva, por lo que es posible prever un futuro promisorio en este ámbito y que la aparición de desarrollos que todavía no podemos incluso imaginar abrirán las puertas a avances aún más sorprendentes.



# Terapia por gestos

**L. Enrique Sucar**

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, INAOE, Puebla  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

En un artículo previo (La Unión de Morelos, 7 de Dic. de 2010: [http://www.acmor.org.mx/descargas/09\\_dic\\_07\\_plasticidad.pdf](http://www.acmor.org.mx/descargas/09_dic_07_plasticidad.pdf)) hablamos de la plasticidad cerebral, esa maravillosa capacidad del cerebro mediante la cual ciertas regiones pueden tomar las funciones de partes del cerebro afectadas, por ejemplo, por una embolia. Ahora vamos a adentrarnos en un sistema computacional desarrollado en México que ayuda a las personas a potenciar esta capacidad del cerebro a través de ejercicios, denominado Terapia por Gestos.

La rehabilitación tradicional de personas que han sufrido una embolia cerebral consiste en hacer

ejercicios repetitivos con los miembros afectados guiados por un terapeuta, lo que se conoce como terapia ocupacional. Aunque este tratamiento ha demostrado buenos resultados para muchos pacientes, tiene dos desventajas: (a) se requiere de un terapeuta, lo que limita el tratamiento porque no todos los pacientes tienen acceso por el tiempo necesario a un especialista, y (b) los pacientes tienden a perder la motivación, ya que la recuperación implica un esfuerzo importante por varias semanas o meses, y muchos no concluyen la terapia y por consiguiente no alcanzan todo el potencial de la rehabilitación.

En el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica



*Figura 1. Se observa uno de los ambientes virtuales del sistema de terapia por gestos, donde el paciente tiene que "cocinar un huevo". El "brazo", que aparece recortado en la imagen, muestra la posición en el mundo virtual del brazo del paciente, quién tiene que mover su brazo para tomar el huevo (ejerciendo presión en la manija), llevarlo al sartén y luego soltarlo.*



*Figura 2. Vemos a uno de los pacientes en el INNN interactuando con el sistema. El paciente sostiene la manija con su mano afectada, interactuando con el ambiente virtual que se observa en la pantalla.*

y Electrónica (INAOE), en colaboración con investigadores y médicos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía (INNN) y la Universidad de California en Irvine, hemos desarrollado el sistema de Terapia por Gestos, el cual combina técnicas de visión por computadora y realidad virtual para ayudar a la rehabilitación de las extremidades superiores de pacientes que han sufrido embolias cerebrales. Este sistema, que se basa en el uso de elementos de bajo costo como son una computadora personal, una cámara y una manija o “gripper”, permite al paciente realizar la terapia en casa sin la necesidad de un terapeuta, y mantiene su motivación al utilizar juegos por computadora con los que interactúa el paciente.

El sistema de Terapia por Gestos consta de elementos físicos (*hardware*) y de programas de computadora (*software*). Los elementos de *hardware* son una computadora, donde se ejecutan los programas;

una video cámara (cámara web), que permite observar los movimientos del paciente; y una manija, que el paciente toma con la mano del miembro afectado, la cual facilita el seguimiento visual de su mano y también mide la presión que ejerce al apretarla.

El *software* lo podemos dividir en dos programas principales: seguimiento visual y ambiente virtual. El programa de seguimiento visual analiza las imágenes que se obtienen de la cámara y realiza el seguimiento de la posición de la mano en el espacio en tres dimensiones. Para ello se auxilia de una esfera de color en un extremo de la manija, que es lo que realmente sigue el sistema. La posición en el espacio de la esfera se estima mediante técnicas de visión por computadora que combinan información de color y textura del objeto, con estimaciones de su posición considerando sus posiciones en las imágenes previas. Estas técnicas están basadas en modelos estadísticos, llamados “filtros de partículas”, que realizan un muestreo de

diversas posibles posiciones de la pelota y seleccionan en cada instante la más probable. Para ello, se aprende un modelo de la apariencia de la pelota de una sola imagen de ejemplo, donde el usuario indica la posición de la pelota en la imagen. Es decir, que a partir de una imagen de la pelota, el sistema construye un modelo estadístico de su color y textura, que luego se utiliza para reconocerla. Después de esto, el sistema puede seguir la pelota en el video, obteniendo su posición en la imagen (horizontal y vertical, o X,Y) y estimando su profundidad (Z) en base al tamaño relativo de la pelota en la imagen.

Una vez que se obtiene la posición de la mano del paciente a través del sistema de seguimiento visual, ésta se envía a un ambiente simulado del estilo de realidad virtual, con el cual interactúa el paciente mediante el movimiento del brazo afectado. En el ambiente virtual, el paciente tiene que realizar diversas actividades que lo obligan a ejercitar el miembro afectado. Para ello, el sistema hace un mapeo de las coordenadas de la mano del paciente en el espacio "real", donde se encuentra el paciente; al espacio virtual, donde interactúa con un mundo imaginario, el cual observa a través de la pantalla de la computadora. Este mapeo de un mundo al otro se puede configurar de acuerdo al paciente y su estado de avance en la terapia; por ejemplo, para pacientes que aún no pueden mover mucho el brazo, se puede hacer que movimientos pequeños de la mano produzcan movimientos grandes en el espacio virtual.

El ambiente virtual para rehabilitación se puede ver como similar a los juegos de video, aunque con dos diferencias importantes. Por un lado, los ejercicios están diseñados de forma que obliguen al paciente a ejercitar las diferentes partes del brazo que son importantes para la rehabilitación, como son el hombro, codo, muñeca, e incluso los dedos;

con diferentes tipos de movimiento como flexión, extensión y presión, entre otros. Por otro lado, los ambientes están diseñados para simular actividades de la vida diaria, ya que lo que se busca es que el paciente pueda regresar a hacer una vida normal. Ejemplos de algunas de las actividades son: limpiar una ventana, pintar un cuarto, cocinar un huevo, ir al supermercado, etc. Un ejemplo de uno de estos ambientes se ilustra en la Figura 1.

El sistema de Terapia por Gestos incluye diversos aspectos tecnológicos interesantes, pero lo más importante es ver si realmente puede ayudar a los pacientes en su proceso de rehabilitación. Para evaluarlo, se realizó un estudio clínico controlado, donde se evalúa su impacto clínico en los pacientes. Para ello, un grupo de pacientes que había sufrido una embolia cerebral utilizaron el sistema de Terapia por Gestos durante varias semanas, y otro grupo de pacientes con características similares recibieron terapia tradicional. Al final, se realiza una evaluación clínica por un terapeuta de cada paciente para ver su mejora, y se compara la mejora promedio en ambos grupos. Los estudios, realizados en la Unidad de Rehabilitación del INNN, muestran resultados similares en cuanto a la mejora del movimiento del miembro afectado para ambos tipos de terapia. Sin embargo, los pacientes que utilizaron Terapia por Gestos, tienen una mucha mayor motivación y apego al tratamiento, elementos esenciales para lograr maximizar la recuperación a largo plazo. En la Figura 2 se observa a uno de los pacientes interactuando con el sistema.

En el futuro, se espera poder comercializar el sistema de Terapia por Gestos para contribuir a la rehabilitación de cientos de miles de personas que sufren embolias cerebrales cada año en México y el mundo.



# Entender nos enriquece: buscar comprender en mecánica cuántica

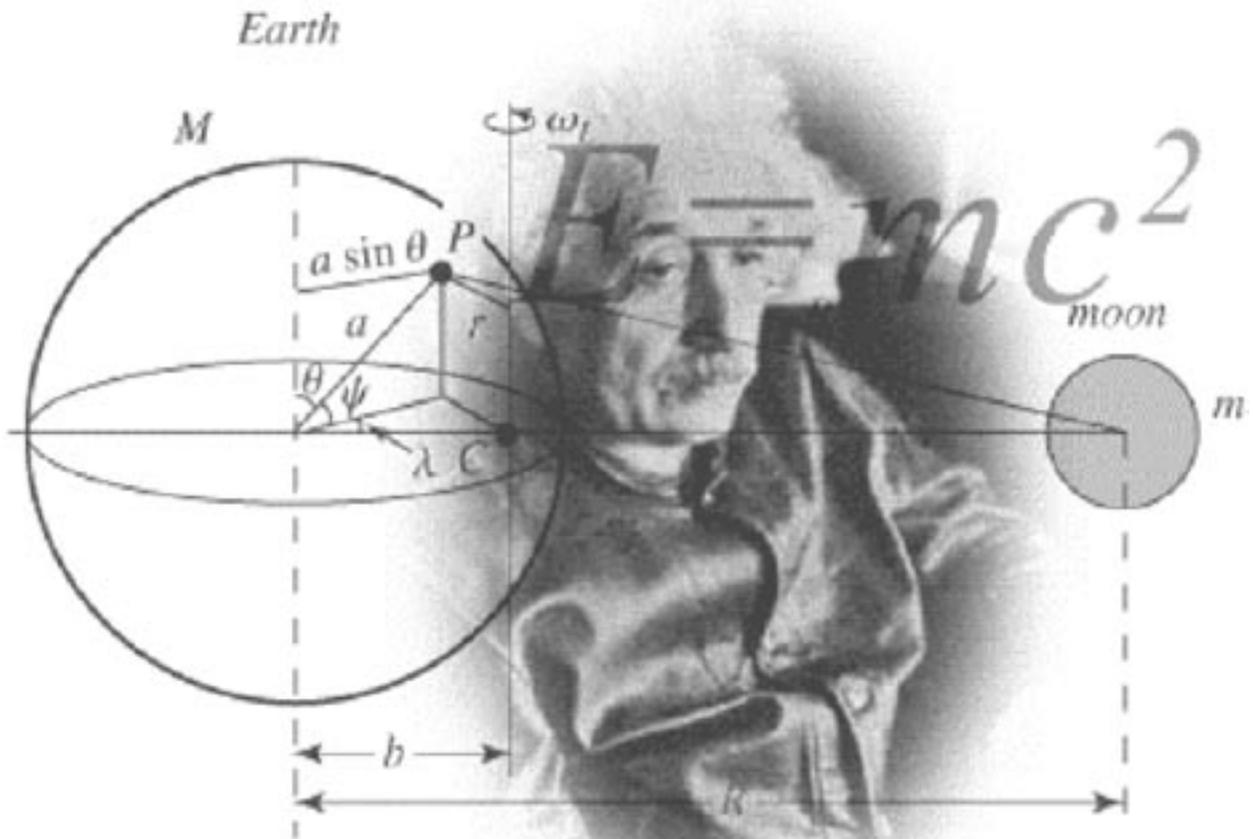
**Julia Tagüeña**

Centro de Investigación en Energía, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

La mecánica cuántica es sin duda la teoría más importante desarrollada en el siglo XX. En ella se basa la mayoría de la tecnología que ha cambiado a nuestra sociedad, como el láser y los chips de las computadoras, y es fundamental para entender el comportamiento de los átomos y las moléculas. Es la base de ramas fundamentales de la ciencia como la física del estado sólido, la física atómica, la física nuclear, la de las partículas elementales, la química cuántica y de la visión molecular de la vida. Sin embargo, es una física muy poco comprendida y poco enseñada. Inclusive, es bastante común que se la utilice equivocadamente en argumentos pseudocientíficos.

En la preparatoria se enseña la mecánica clásica,

la que funciona a nivel de objetos grandes, es decir, la mecánica que sirve para hacer puentes y para entender el movimiento de los objetos, por ejemplo las pelotas en los deportes. Esta mecánica es bastante intuitiva porque se relaciona con fenómenos que vemos y muchas veces sentimos. En cambio, en la física del mundo del tamaño de los átomos pasan cosas muy raras, que contradicen nuestra intuición y nuestra experiencia cotidiana. La luz que es una onda se puede comportar como una partícula, un cuanto (quantum) de energía, llamada fotón y el electrón que es una partícula se puede comportar como onda, por la llamada dualidad onda/ partícula. Tal vez su principio más difícil de asimilar es el de incertidumbre, que



*A Einstein nunca terminó de gustarle la mecánica cuántica; sin embargo, explicó con mecánica cuántica el efecto fotoeléctrico y eso le dió el premio Nobel.*

nos dice que no podemos tener toda la información de una partícula: si le medimos su posición perdemos precisión en la medición de su velocidad y viceversa. No podemos conocer totalmente el presente, ni el futuro. Podemos sólo hablar de probabilidades de ocurrencia.

La mecánica cuántica nació al principio del siglo XX y produjo entre los científicos una gran discusión de tipo filosófico, porque cambió dramáticamente el concepto de realidad y el de capacidad de medición. A Einstein, por ejemplo, no le gustaba (aunque fue uno de sus creadores al explicar el efecto fotoeléctrico con argumentos cuánticos) y se dedicó a proponer experimentos pensados para tratar de contradecirla. Nunca lo logró y ya después de muerto, el experimento finalmente realizado de la llamada paradoja Einstein, Podolsky y Rosen (EPR), volvió a dejar a la mecánica cuántica triunfadora y ahora se conoce como el efecto EPR.

Después de la segunda guerra mundial se tomó un enfoque mucho más pragmático en la enseñanza de la mecánica cuántica en las universidades. En lugar de discutir sus implicaciones filosóficas, los estudiantes aprendieron a manipular sus ecuaciones y a resolver problemas. Aparecieron así sus aplicaciones tecnológicas, que de ninguna manera han terminado, ya que la tan famosa nanotecnología, considerada una de las tecnologías emergentes del siglo XXI, se basa en ella.

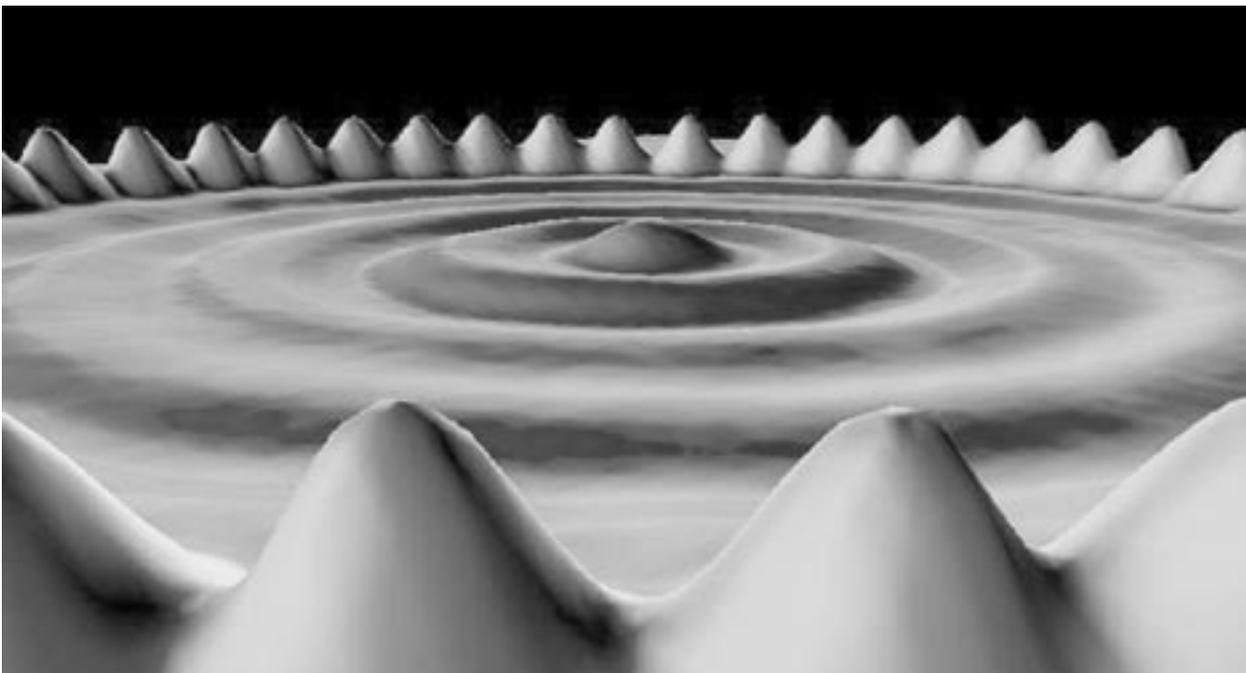
Curiosamente hay dos aplicaciones nuevas de la mecánica cuántica que están reviviendo la discusión filosófica por sus implicaciones: una es la teletransportación cuántica y otra la computadora cuántica. Estas aplicaciones, que suenan a ciencia ficción, están desde luego relacionadas. Ya se han logrado teletransportar fotones a través de distancias considerables, lo que cambiará nuestra capacidad

de comunicación. Una de las aplicaciones más importantes de las computadoras cuánticas será la criptografía, para mandar (o teletransportar) mensajes secretos que no se puedan descifrar.

Unas palabras sobre qué es la teletransportación. Es importante notar que no se teletransporta materia, sino la información de la estructura (por eso es imposible teletransportar un ser humano que tiene una estructura con millones y millones de partículas). El objeto desaparece, cambia su estructura y en su destino aparece otro objeto, con su estructura original. No es una duplicación. Es como una máquina de fax tridimensional que altera al objeto que fotocopia.

Se pensaba que debido al principio de incertidumbre, que nos impide tener toda la información de la estructura, no sería posible teletransportar. Pero en 1993, un grupo de IBM, encabezado por Bennett, propuso que podría lograrse usando el ya mencionado efecto EPR. En este efecto, que Einstein llamó la “tenebrosa acción a distancia”, dos partículas en interacción, por más que se separen siguen afectando una a la otra. Este tipo de estado se llama estado enredado (“entanglement” en inglés). Así, si el emisor y el receptor tienen cada uno una partícula en estado enredado (hay que cuidarlas mucho, porque es un estado muy endeble que colapsa fácilmente) se pueden utilizar para teletransportar un mensaje.

El lector en este momento puede decir ¿y para qué tengo yo que saber todo esto?. Desde un punto de vista práctico, podemos usar las aplicaciones de la mecánica cuántica sin comprenderlas o cuestionarlas. Sin embargo, entender mejor a la naturaleza, al mundo que nos rodea, especialmente al que no podemos ver, sin duda nos enriquece. Cuanto más entendemos, somos más libres frente a descripciones incorrectas y más críticos en la búsqueda del conocimiento. Baste esto para buscar entender la mecánica cuántica.



# El significado de la palabra “cuántico”

**Alejandro Ramírez Solís**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

El mundo ha cambiado drásticamente en los últimos 40 años gracias al desarrollo de “la tecnología”. Esta es una frase muy trillada, siendo usada en los más variados contextos, desde escuelas y universidades presentada como argumento de publicidad de sus programas, pasando por anuncios comerciales de bancos, autos, aviones, computadoras, hospitales, compañías de comunicaciones y hasta en reuniones políticas. Pero lo que la mayoría de la gente ignora, es que este desarrollo de la tecnología tiene una razón fundamental basada en una rama muy particular de la física, llamada mecánica cuántica.

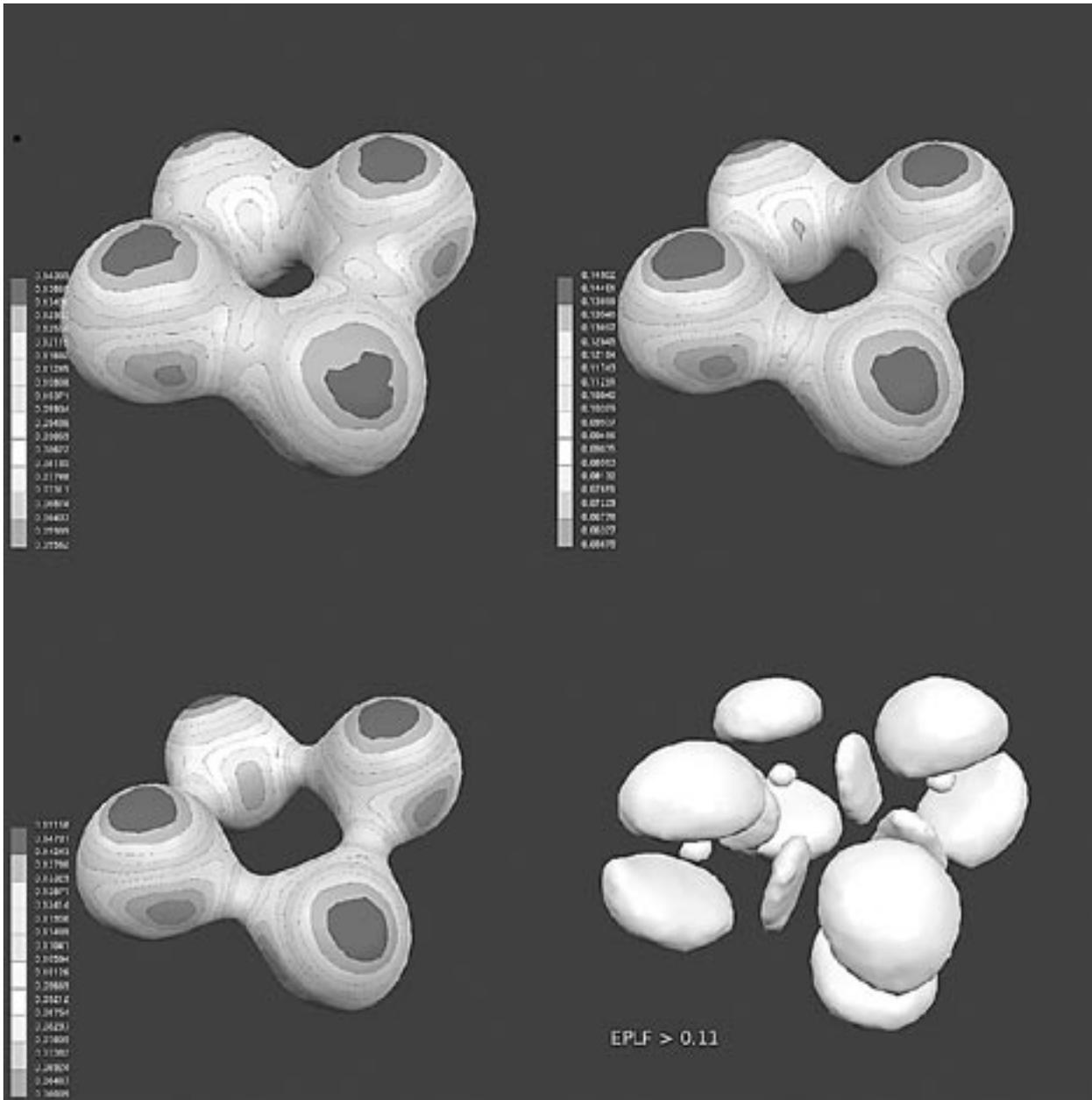
La falta de conciencia del público acerca de la ubicuidad de aplicaciones de la mecánica cuántica en el mundo que nos rodea es generalizada y no es exclusiva de nuestro país, pero basta mencionar que ésta se aplica en absolutamente todos los dispositivos electrónicos con los cuales se construyen computadoras, autos, aviones, hornos de microondas, satélites, aparatos basados en LASER como CD y DVD, en televisores, radios, en redes de telefonía alámbrica y celular, el Internet, sistemas de navegación marina y aérea, y mas recientemente, en las pantallas de plasma. También la medicina se ha beneficiado con aplicaciones cuánticas como la Imagen por Resonancia Magnética Nuclear (IRMN), la Tomografía de Emisión de Positrones (PET), la cirugía y cauterización con LASER. ¿Cómo es entonces que hacemos uso de toda esta tecnología sin preguntarnos a fondo cómo funciona? En entregas posteriores abundaremos sobre algunos de los temas más populares, en particular el LASER y el horno de microondas. Aquí haremos un recuento breve del origen de la mecánica cuántica.

Esta rama de la física se consolidó hasta 1925, por una sencilla razón: hasta finales del siglo XIX se desconocían aun los elementos básicos que componen la materia y, debido a la extraordinaria pequeñez de éstos, no fueron accesibles a experimentos que los pusieran en evidencia hasta la década de 1890. Se pensaba que todos los fenómenos físicos conocidos hasta fines del siglo XIX podían ser explicados por las otras tres ramas mayores de la física; la mecánica clásica, la electrodinámica clásica y la termodinámica o por combinaciones de éstas; por ejemplo, los fenómenos acústicos pueden explicarse con la mecánica clásica y la termodinámica. Sin embargo existían dos problemas para los cuales la Física Clásica no ofrecía explicación alguna, a pesar de que cada una de estas áreas había tenido éxitos impresionantes en la comprensión y la predicción de

la mayoría de los fenómenos físicos. Por ejemplo, con la mecánica de Newton (1643-1727) es posible explicar el movimiento de los planetas, estrellas y galaxias, con ella basta para llegar a la Luna. Con la electrodinámica clásica, brillantemente condensada en cuatro ecuaciones por James C. Maxwell (1831-1889) se explican y predicen todos los fenómenos eléctricos, los magnéticos, así como toda la óptica. Esta teoría permitió unificar la comprensión del campo electromagnético como una onda de campo eléctrico que oscila en una dirección, un campo magnético que oscila en otra perpendicular, y que viaja en la dirección perpendicular a ambos.

Había algunos problemas básicos que la física clásica no podía explicar. El físico prusiano Gustav Kirchoff (1824-1887) descubrió la constancia del tipo de radiación (léase de luz, visible y no visible) que emite un cuerpo sólido calentado a cierta temperatura, sin importar de qué material esté hecho. Sabemos que un metal caliente se pone rojo, luego naranja, amarillo y luego parece blanco conforme se calienta más; lo más sorprendente es que esto ocurre exactamente igual con cualquier material. Kirchoff llamó esto en 1862 “radiación de cuerpo negro”, y no fue posible explicarlo sino hasta 1900, cuando el físico alemán Max Planck (1858-1947) propuso que la radiación no siempre se comporta como una onda electromagnética, sino que en ciertas circunstancias se comporta como si fueran paquetes de energía o “cuantos de energía” (estilo canicas), y que el tamaño de éstos está directamente relacionado con la frecuencia de la onda electromagnética clásica. Por esto Planck es considerado el padre de la teoría cuántica.

Otro problema que la física clásica no podía explicar también tenía que ver con luz, pero ahora con la que un gas caliente tenue emite o absorbe, siendo un proceso discontinuo, es decir no emitiendo en todas las longitudes de onda sino únicamente en ciertas de ellas, caracterizando este “espectro” a cada elemento de la tabla periódica. Esto fue explicado en 1913 para el caso del hidrógeno por el físico danés Niels Bohr (1885-1962). En 1921 Louis de Broglie (1892-1987) formuló la revolucionaria hipótesis ondulatoria de la materia, cuya confirmación experimental fue hecha por Davison y Germer en 1925. Surgieron dos versiones equivalentes de la mecánica cuántica, una en 1925 por el físico alemán Werner Heisenberg (1901-1976) llamada “mecánica de matrices”, y otra en 1926 por el austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) con su “Mecánica ondulatoria”. Así se descubrió que en realidad la



Isodensidad electrónica de la molécula de O4. En el tono más oscuro zonas de alta probabilidad de encontrar 2 electrones simultáneamente, en el tono oscuro más tenue las zonas de baja probabilidad.

materia no es materia, sino ondas de probabilidad, que pueden comportarse de manera totalmente inesperada y aparentemente absurda a escalas menores de 1/100,000 de milímetro. Los efectos cuánticos surgen a escala molecular y menores, pero tienen consecuencias a escala macroscópica, por ejemplo, en las propiedades de la luz de un LASER, por qué el cielo es azul, por qué sólo el oro es dorado,

por qué el agua se expande al congelarse, o por qué los metales se sienten fríos.

Gracias a la mecánica cuántica y sus implicaciones en diversas áreas, como la física de partículas elementales, la física nuclear y, particularmente de la física atómica, molecular y del estado sólido, gozamos ahora sin darnos bien cuenta por qué, de una enorme cantidad de beneficios en nuestra vida diaria.

# La mecánica cuántica y su relación con las matemáticas

**Natig Atakishiyev**

Instituto de Matemáticas-Unidad Cuernavaca, UNAM- Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A.C.

Al inicio de la actividad intelectual en la historia humana, la Física y las Matemáticas no estaban separadas, ambas formaban lo que se conoce como “Filosofía Natural.” Aunque eventualmente empezaron a separarse por distintos requerimientos intelectuales, en la práctica nunca se han separado completamente. Es notable el hecho de que al construir teorías más profundas que nos permiten describir distintos fenómenos físicos que ocurren en nuestro derredor, esta interdependencia entre la Física y las Matemáticas aparece en una forma más clara. Veamos, por ejemplo, el caso de la Mecánica Cuántica que se desarrolló a principios del siglo XX.

En la Mecánica Clásica, formulada originalmente por Galileo, Newton y sus seguidores para describir el movimiento de cuerpos macroscópicos (por ejemplo una bola de billar o los planetas), todos los objetos materiales en movimiento deben describirse en términos de su posición,  $x$ , y su velocidad,  $V_x$  (o su momento  $P_x$  que es la velocidad  $V_x$  del objeto multiplicada por su masa,  $m$ ), ambas medidas en el mismo instante de tiempo,  $t$ . Por su parte, la Mecánica Cuántica surgió de la Mecánica Clásica al tratar de describir fenómenos a una escala microscópica, como los que se presentan en

átomos y moléculas. En la Mecánica Cuántica, un gran número de experimentos afinaron las formulaciones de la teoría y mostraron que los objetos materiales a escala microscópica no obedecen las leyes de la Mecánica Clásica y que sólo es posible medir en un mismo instante de tiempo la posición o la velocidad de la partícula, pero no ambas simultáneamente. Una conclusión inmediata de este descubrimiento experimental fue que en el mundo de los micro-objetos, uno no puede observar su movimiento con la misma precisión que en el Mecánica Clásica. Por tanto, los físicos necesitaban inventar otras formas para describir a las partículas microscópicas en movimiento usando sólo sus posiciones, o bien, sólo sus velocidades.

Finalmente, se encontró un camino maravilloso: los micro-objetos deben describirse mediante la probabilidad de encontrarse con una cierta velocidad o en una cierta posición. Es decir, en vez de determinar con precisión la posición y la velocidad de una partícula, se adoptó una descripción probabilista. Debe dejarse claro que aunque existen otras descripciones posibles de la mecánica cuántica, la descripción probabilista es la más completa y la que tiene mayor aceptación entre los físicos. La manera de introducir la probabilidad en la descripción de los fenómenos microscópicos fue a través de lo que se conoce como la función de onda. Así, cada partícula tiene asociada una función de onda (de posición  $\Psi(x)$ , o de velocidad  $\Psi(P_x)$ ) y el cuadrado del módulo de esta función define la probabilidad de encontrar a la partícula en cierto punto, o bien, con cierta velocidad, respectivamente. De esta forma, si nos encontramos observando una partícula que realmente existe, la probabilidad total de detectar a dicha partícula en algún sitio de todo el espacio, debe ser igual a 1. Así, desde los primeros pasos en la creación de la Mecánica Cuántica, fue claro que la teoría de la probabilidad debía ser la base de dicha teoría.

Un paso crucial en el desarrollo de la Mecánica Cuántica fue la introducción de variables que pudiesen ser observadas físicamente (llamadas observables) sin caer en contradicciones con la interpretación probabilista de la función de onda. Desde el punto de vista puramente matemático, esto implica realizar ciertas operaciones sobre la función de onda que finalmente deben tener una interpretación física clara. El enlace entre los objetos de la matemática pura y su interpretación física, es el siguiente: todas las variables físicas observables, es decir, aquellas variables que podemos medir experimentalmente, son valores promedios de las operaciones realizadas sobre las



Erwin Schrodinger.

funciones de onda; este valor medio debe medirse experimentalmente.

Cuando lo anterior fue aceptado, la construcción general de la llamada Mecánica Cuántica Probabilista se volvió lógica y bella. En particular, la condición de que la posición y la velocidad de una partícula no puedan medirse simultáneamente, encuentra su representación matemática en lo que se conoce como el principio de incertidumbre de Heisenberg que involucra a la famosa constante de Planck. El desarrollo de la Mecánica Cuántica implicó la búsqueda de un lenguaje matemático adecuado que permitiera realizar los cálculos necesarios y a la vez fuera susceptible de ser interpretado claramente en términos físicos. De esta forma, herramientas y conceptos matemáticos abstractos que fueron desarrolladas en otros contextos, encontraron una aplicación en esta teoría con un significado físico bien definido.

Al exponer algunos aspectos de la Mecánica Cuántica, hemos tratado de transmitir nuestra admiración ante de la belleza de estas dos maravillosas creaciones de la mente humana: la Física y las Matemáticas. Esperamos que aquellos jóvenes mexicanos que están a punto de elegir su carrera, la profesión que ejercerán en el futuro, piensen en la posibilidad de estudiar estas fascinantes ciencias básicas. Por supuesto, nos gustaría que también sus padres leyesen estas notas y encontraran alguna(s) razón(es) para aconsejar a sus hijos en la elección: Física o Matemáticas.

Sabemos que existen muchas otras profesiones respetables en la sociedad y que es posible que muchas parezcan preferibles desde el punto de vista de la futura prosperidad de quienes las cultiven; sin embargo, los que nos dedicamos a las Matemáticas y a la Física nos consideramos muy afortunados por tener la posibilidad de disfrutar en nuestra vida cotidiana de ambas.



*John vonNeumann.*

Muchas personas influyen en nuestra decisión al elegir una carrera; una forma de agradecer tales consejos, es atraer a nuevos estudiantes y convencerlos de que seguir cualquiera de estas dos carreras, es una elección correcta. La elección entre física y matemáticas, es una elección libre y personal; quien esté a punto de elegir su carrera profesional, podrá elegir Física o Matemáticas, e inclusive, elegir ambas. Estas dos carreras se puedan estudiar en la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM).

**EL AUTOR AGRADECE LA COLABORACIÓN DE UN AMIGO QUIEN HA DECIDIDO PERMANECER ANÓNIMO.**



*Max Planck.*



*Werner Heisenberg.*

# El oscilador armónico

**Kurt Bernardo Wolf**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A.C.

**Guillermo Krötzsch**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos

El propósito de este artículo es describir el prototipo más sencillo y perfecto de un sistema cuántico: el oscilador armónico, y revisar algunas consecuencias que este modelo ha tenido en la filosofía de la ciencia contemporánea.

Para ello, debemos primero referirnos al oscilador armónico clásico: es un modelo que abstrae varios sistemas mecánicos y ópticos que vemos en la vida diaria. Imaginen una pequeña masa unida a un punto fijo mediante una liga perfectamente elástica, es decir, cuya elongación es directamente proporcional a la fuerza que usamos para estirarla. Si desplazamos la masa y la soltamos, la masa oscilará de un lado a otro del punto de equilibrio con un movimiento llamado armónico, como ilustramos en la Figura 1. La segunda ley de Newton nos remite inmediatamente a resolver la trayectoria y velocidad de la partícula: son curvas descritas por las funciones trigonométricas de seno o coseno, las cuales son favoritas de la naturaleza. Si graficamos la elongación contra la velocidad de la masa y dejamos correr el tiempo, vemos que su trayectoria recorre un círculo; podemos así interpretar la evolución del oscilador como una rotación del plano elongación-velocidad. A éste se ha llamado plano-fase, el cual rota rígidamente alrededor del origen de coordenadas; el oscilador armónico es el único sistema con esta propiedad.

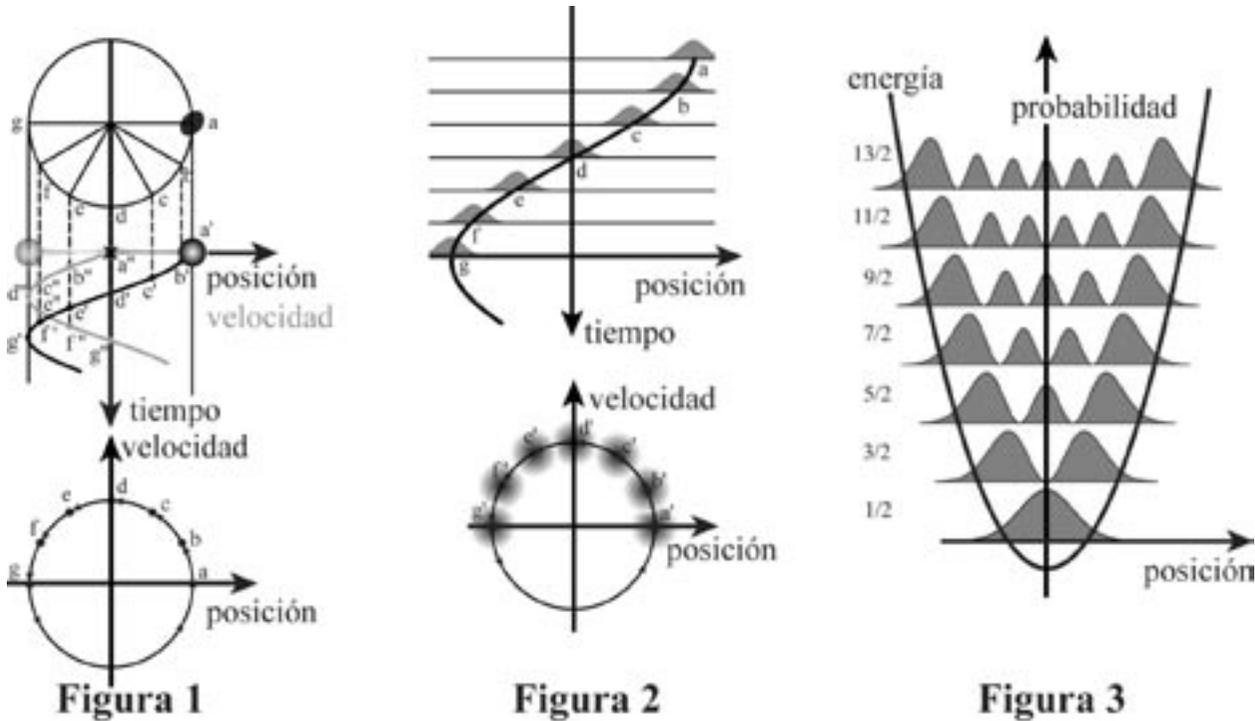
La mecánica cuántica difiere de la clásica en que su descripción es probabilística, es decir, reconoce que las coordenadas de una partícula en el plano-fase no determinan un punto, sino la pequeña área donde es mayor la probabilidad de encontrarla. Esta función de probabilidad es el objeto primario que maneja la mecánica cuántica obedeciendo la relación de incertidumbre de Heisenberg: las posiciones de las partículas sub-microscópicas como los electrones, no pueden ser sujetas a una determinación exacta sin que el mismo acto de medición perturbe su posición y velocidad. Son dos las funciones de probabilidad del oscilador armónico cuántico que presentan el mayor interés: aquéllas que más se acercan a la descripción clásica, los llamados *estados coherentes* ilustrados en la Figura 2, y aquéllas que tienen una energía definida, llamados *estados propios*, que mostramos en la Figura 3. Ambos pueden compararse con el movimiento del oscilador en la primera figura.

Los estados coherentes del oscilador son usados

para tratar la luz que se desprende de un láser e interacciona con materia; su estudio y producción experimental durante los años 60s valieron el premio Nobel en física otorgado a Roy Glauber en 2006 [ver nota 1, al final del texto]. Por otra parte, los estados propios fueron los primeros en ser estudiados y se usaron desde los años 30s para el cómputo de los niveles de energía en modelos del núcleo atómico, también produciendo varios premios Nobel. El movimiento armónico es ubicuo en la naturaleza; lo podemos ver en la sombra de la manivela de una rueda que gira, lo podemos escuchar en una frecuencia pura, tocar en la cuerda de una guitarra, y mirar en el abanico de colores del arco iris.

Entre los detractores de la teoría cuántica basada en distribuciones de probabilidad estuvo Albert Einstein, quien argüía un tanto metafísicamente que Dios no juega con dados. Chocaba con su intuición que la posición de una partícula no pudiera ser localizable en un punto, sino que estuviera distribuida probabilísticamente en todo el espacio, como en la Figura 3. ¿En cuál de los máximos se encontrará la masa? ¿en todos? La mecánica cuántica predice además que las partículas pueden encontrarse en una superposición de estados; es decir, que pueden “estar” en dos o más regiones distantes del espacio al mismo tiempo. Su colega y oponente Niels Bohr, mantenía la opinión que sólo los resultados del cálculo tienen sentido y que toda pregunta fuera del contexto matemático es como buscar el color del número tres. Este punto de vista, si bien no satisfacía la intuición clásica, sí predecía correctamente todos los resultados experimentales.

En 1935, Einstein y sus colegas Boris Podolsky y Nathan Rosen publicaron un artículo sutil pero devastador sobre la superposición de estados en sistemas cuánticos, que llegó a ser conocido como la paradoja EPR, y concluyendo que la mecánica cuántica es una teoría incompleta. Argumentos en pro y en contra de esta tesis campearon durante las siguientes tres décadas, hasta que en 1964 John Bell disecó el problema demostrando que ninguna otra teoría (con “variables ocultas”) podría reproducir los resultados de la mecánica cuántica, que para entonces ampliaba sus predicciones a una gama cada vez mayor de sistemas físicos, como el estado sólido, la criogenia, la superconductividad, el efecto láser, además de la



**Figura 1:** La manivela fija a una rueda que gira (arriba, a–g) proyecta una sombra, la cual se mueve igual que una masa unida por una liga a su punto de equilibrio X: con un movimiento armónico (a'–g'); su velocidad también varía armónicamente (a"–g"). En el plano posición-velocidad (abajo, el plano fase) su trayectoria en el tiempo equivale a una rotación rígida de éste.

**Figura 2:** Oscilador armónico cuántico, donde la probabilidad está dada por el área bajo las curvas. Los estados coherentes se mueven de la misma manera que el modelo clásico de la figura anterior y tienen una función de probabilidad con incertidumbre mínima.

**Figura 3:** Estados propios tienen distribuciones de probabilidad más anchas mientras más alta es la energía. ¿En dónde se encuentra la partícula? En todas partes.

fisión y fusión nucleares. Pero tuvieron que pasar otras tres décadas para que durante los 80s las técnicas de la física experimental pudieran poner a prueba los aspectos más álgidos de la paradoja EPR, y otras tres décadas más para que hoy en día se entiendan y utilicen estos conceptos en áreas como la información y la criptografía cuánticas, ya comprobados mediante experimentos de creciente sofisticación con el manejo individual de átomos y de fotones en estados de superposición.

Cuando estudiábamos física en los años 60s nos preguntábamos si las matemáticas de la mecánica cuántica eran más confiables que la intuición que pregonaban los filósofos humanistas, cuyas herramientas mentales eran las mismas de Platón, Tomás de Aquino, Kant o Gramsci. Asistí (dice esto KBW) varias veces al Seminario de Filosofía de la Ciencia que se reunía en la Facultad de Filosofía de la UNAM, donde recuerdo con pena ajena los vericuetos argumentativos que presentaba el eminente doctor Eli de Gortari para tratar de justificar ante sus colegas y estudiantes los fundamentos de la mecánica cuántica sin apoyarse en precisión matemática alguna; con solo movimiento de manos. Sospecho que justificar la mecánica cuántica sólo a partir de principios filosóficos es imposible, porque nuestra intuición

proviene de nuestros cinco sentidos ancestrales y primigenios. La razón es otra cosa.

Pero no piense el lector que ahora todo está entendido, como nunca lo está en la ciencia. Porque si aceptamos que la mecánica cuántica describe la realidad objetiva de lo infinitesimal, caemos en desavenencias con el segundo pilar de la física moderna: la teoría de la relatividad. La paradoja EPR vuelve a levantar su horrible cabeza cuando ciertas predicciones implican la trasmisión instantánea de influencia causal (transporte de materia, de luz o, en este caso, de información), que aún el sentido común científicamente educado juzga imposible. Habrá que esperar que nuevos y más ingeniosos experimentos diluciden las aparentes contradicciones que aún percibimos en las bases de nuestro entendimiento de la naturaleza. El árbol de la ciencia crece, sus ramas se multiplican y florecen sus aplicaciones; mientras, los que exploramos sus fundamentos somos sus raíces, intentando llegar hasta el centro de la tierra.

[1] El Prof. Roy Glauber participó en el Taller Internacional "Osciladores armónicos II" que organizamos con el hoy Centro Internacional de Ciencias AC en Cocoyoc, durante marzo de 1994.

# ¿Qué rayos con las descargas eléctricas?

**Jaime de Urquijo**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM-Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Una de las propiedades importantes de la materia en cualquiera de sus estados es la capacidad para transportar la carga eléctrica, hablándose de que una corriente circula a través de dicho material. En general, nos resulta más familiar pensar en un material conductor cuando éste es un sólido metálico, que cuando se trata de un líquido o un gas. En general, sabemos que los metales son buenos conductores de la electricidad, y también que sólidos como el diamante o el vidrio son extraordinarios aislantes eléctricos. De hecho, actualmente vivimos rodeados de conductores eléctricos –cobre, por lo general- aislados por plásticos u otros materiales aislantes. También sabemos que el agua, entre más sales contenga, es mejor conductora de la electricidad. Así, por ejemplo, la tierra húmeda es un buen conductor, y se la usa como referencia de voltaje, ya sea en pararrayos o en las grandes redes eléctricas. ¿Pero qué evidencia cotidiana podemos tener de un gas conductor? Las hay, y muchas, pero de esto poco se habla en los cursos de electromagnetismo. Por ejemplo, la flama de un cerillo o de la hornilla de la estufa casera es un caso común, ya que en su región caliente hay portadores de carga, es decir, electrones e iones, que vuelven conductora a esa región del gas. Recordemos que los electrones son partículas elementales de carga negativa, que orbitan alrededor de los átomos, y que los iones son átomos o moléculas que han perdido uno o más de sus electrones, dejando al átomo o molécula con un exceso de carga positiva, ya que en su estado neutro los electrones igualan a los protones en el núcleo. A este ión se le llama positivo. También hay iones negativos, que resultan de aquellos átomos o moléculas capaces de capturar un electrón libre. En este caso, el número de electrones excede al de los protones. En el otro extremo de la experiencia cotidiana tenemos al rayo o relámpago que se forma durante las tormentas atmosféricas. Estas estructuras gigantescas, muchas de las cuales ocurren entre las nubes y la tierra, constituyen un canal conductor de electricidad que llega a portar corrientes de miles de amperes, con diferencias de potencial nube-tierra de millones de volts. Para comparar, pensemos que una plancha casera opera con una diferencia de potencial de 120 volts y una corriente de 5 amperes.

En general, el aire atmosférico no es un buen conductor, y prueba de ello son los miles de cables que, por cierto, afean nuestras calles, portando la energía eléctrica necesaria para consumo doméstico, y entre los cuales no ocurren descargas eléctricas. ¿Cuál es la razón de ello? Pues se debe a la separación que

existe entre los cables, que es varias veces mayor a aquella que haría que el aire se volviese conductor. Si los cables se acercan más de este límite, ocurre una descarga entre éstos. De hecho, este fenómeno ha sido muy común en Cuernavaca cuando se inicia la temporada de lluvias, con fuertes ventiscas que acercan los cables entre sí. Cuando esto ocurre, entonces estamos ante un fenómeno físico conocido como la “ruptura del gas”, queriendo decirse con esto que el aire ha pasado de ser un aislante a un conductor de la electricidad.

¿Y cómo es que se consigue este fenómeno de conducción en los gases? Entre la lista de ingredientes esenciales debemos contar con electrones y/o iones, y además con un campo eléctrico que ejerza una fuerza sobre éstos, y los desplace. Desde luego, también está presente una masa enorme de gas neutro, no ionizado, en este caso aire. El campo eléctrico se origina por la diferencia de potencial o “voltaje” entre los cables, y los portadores de carga, que se encuentran en el aire ambiental, producidos entre otras fuentes por rayos cósmicos o radioactividad natural. Cuando arranca el proceso que inicia la conducción en los gases, al cual se le conoce como “ruptura”, basta con que un electrón ronde la zona de interés para que el campo eléctrico lo acelere a energías tales que se impacte contra alguna molécula constituyente del aire, ya sea ésta oxígeno (21 %) o nitrógeno (79 %), y que a causa del impacto provoque que estas moléculas pierdan uno de sus electrones, es decir, que queden ionizadas, y se genere un electrón libre adicional. Ahora imaginemos, en otro cuadro de la película, que estos dos electrones se impactan contra sendas moléculas, y les desprenden otros dos electrones, teniendo ahora cuatro electrones y tres iones; si esto continúa, tendremos una avalancha que crecerá exponencialmente como  $2^n$ , donde “n” es el número de la colisión. Por ejemplo, después de sólo 20 colisiones, generadas a partir de un solo electrón, tendremos un millón de electrones generados. Si la distancia entre los cables es de medio metro, entonces podrán ocurrir millones de colisiones, lo cual podrá constituir una corriente eléctrica de magnitud considerable. Es importante decir que un electrón en el aire se mueve a una velocidad cercana a los 300,000 km/hr, razón por la cual una descarga intensa puede encenderse en tiempos tan breves como centésimas de segundos. Entonces, dependiendo de las condiciones en que se inicia la descarga, podemos tenerlas débiles, como ésas que conocemos como chispas, u otras muy intensas, como los relámpagos. Para cerrar este



*Tan débil como la flama de un cerillo o potente y majestuoso como un rayo, ambos son descargas eléctricas.*

párrafo, no olvidemos que la descarga eléctrica se debe al movimiento de los portadores de carga libres, sean éstos electrones o iones, o ambos, y a la presencia de un campo eléctrico.

En las descargas atmosféricas que nos resultan tan familiares, las trayectorias de los rayos que observamos son aquellas regiones en las que los gases atmosféricos se han ionizado fuertemente, es decir, aquellas en las que el gas se ha vuelto un plasma, del cual hablaremos en entregas futuras. Por ahora, bástenos decir que uno de estos rayos puede portar corrientes eléctricas entre los diez mil y cien mil amperes (en órdenes de magnitud). La duración de estas descargas es de sólo unas centésimas de segundo, y la potencia promedio de un rayo de éstos llega a ser de un terawatt (un millón de millones de watts) . Estas descargas atmosféricas calientan rápidamente el aire circundante a cerca de 20,000 grados centígrados, comprimiéndolo, y creando una onda de choque que deviene en una onda acústica, que conocemos como el trueno. Este espectáculo, siempre novedoso e impresionante, no importa cuántas veces

lo hayamos visto, tiene otra característica singular que nos resulta muy familiar: nuestros ojos lo ven mucho antes que nuestros oídos lo perciben. La razón está en que este gas ionizado contiene una enorme cantidad de átomos y moléculas en estados excitados que emiten luz, misma que llega a nuestros ojos, viajando a una velocidad cercana a los 300,000 kilómetros por segundo, en tanto que la gigantesca onda acústica se desplaza a sólo 330 metros por segundo, es decir, casi un millón de veces más lentamente.

Antes de concluir, quiero aclarar al lector que el rayo es sólo un fenómeno entre una multitud de descargas eléctricas, tanto naturales como inducidas. Con la tecnología actual, ha sido posible desarrollar una gran variedad de descargas eléctricas que tienen muchas aplicaciones tecnológicas. Quizás el lector mantenga el interés en este tema si le cuento que entre algunas descargas gaseosas importantes, contamos las que ocurren en la corona solar, las auroras boreales, o bien en las televisiones de plasma y los focos ahorradores de energía, pero esto será tema de otras entregas.

# El tiempo

**Julia Tagüena**

Centro de Investigación en Energía, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

*Vamos a guardar este día  
entre las horas para siempre  
Jaime Sabines*

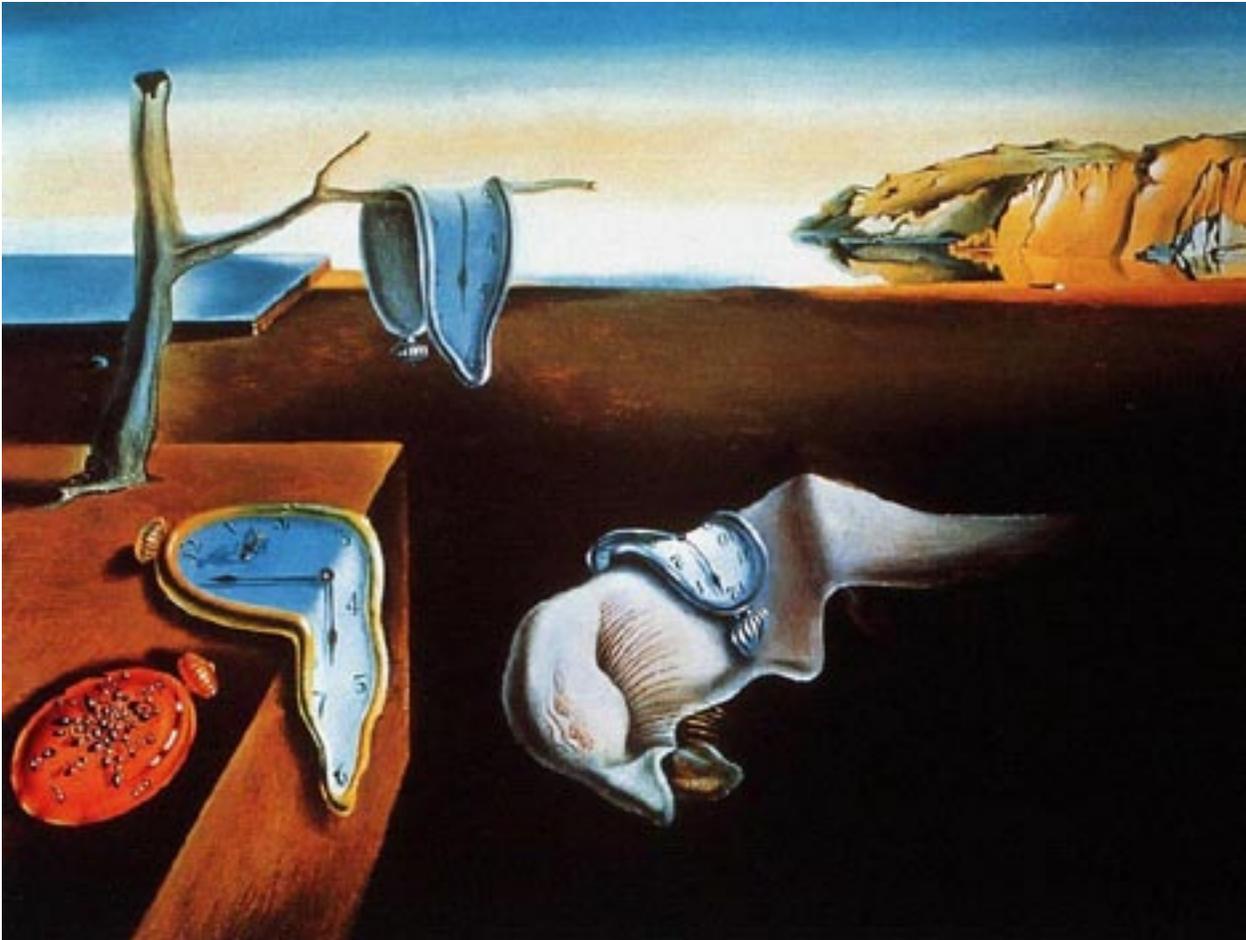
Todos tenemos una idea intuitiva de qué es el tiempo, pero como suele suceder con todo lo cotidiano, sentirlo y explicarlo son dos cosas muy diferentes. Hay un tiempo objetivo y uno subjetivo, de ahí viene tanta riqueza. Hay un tiempo que mide el reloj y un tiempo que mide el estado de ánimo. Nuestra experiencia del tiempo depende de nuestra edad, de nuestro estrés, de nuestra cultura. ¿A dónde va el tiempo? ¿Qué hacemos con el ocio, con el

tiempo libre? Hay expresiones artísticas que son en cierta manera temporales, como la poesía y la música, con su ritmo y sus repeticiones, a diferencia de las artes espaciales, como la escultura y la arquitectura. Tanto en la ciencia, como en el arte, como en la vida cotidiana, más que el tiempo nos interesan los cambios en el tiempo, qué pasa en los intervalos, en los momentos. La diferencia de tiempos nos lleva a las matemáticas y al concepto de límite, cuando el intervalo de tiempo se hace cada vez más pequeño.

En física las propiedades deben de cuantificarse, medirse, para poder hablar de ellas. Lo más fácil es explicar el tiempo a partir de su medición. Para medir hay que definir unidades y aparatos. Lo que es



*Los relojes están por todas partes, incluida nuestra muñeca.*



*La persistencia de la memoria, Salvador Dalí (1931).*

interesante del concepto tiempo es que para medirlo tenemos que usar un movimiento periódico, es decir un movimiento que se repite. La Tierra girando alrededor de ella misma, girando alrededor del Sol, un péndulo yendo y viniendo. Los relojes se han ido perfeccionando. Antes eran todo referencias astronómicas. Ahora los relojes atómicos se calibran con las vibraciones de átomos de cesio y ese sí es un reloj único, más confiable que el basado en los planetas. Podemos medir nanosegundos. Pero nuestra mente no puede detectar eso. En un milisegundo un bat golpea una bola y una piedra entra al agua. No podemos distinguir qué pasa en menos tiempo que eso. Para nosotros en un nanosegundo la pelota y la piedra no se mueven, pero sí es una unidad importante para un GPS (por Global Positioning System que localiza la posición mediante las señales de los satélites de comunicación), que podría dar un error de casi medio metro. Esa capacidad de medir el tiempo nos ha hecho ir cada vez más rápidamente, buscar cada vez más récords de velocidad en los deportes y hablar de diferencias de fracciones de segundo. Medir el tiempo en forma tan precisa ha cambiado nuestro estilo de vida.

Entonces, lo más fácil para hablar del tiempo es

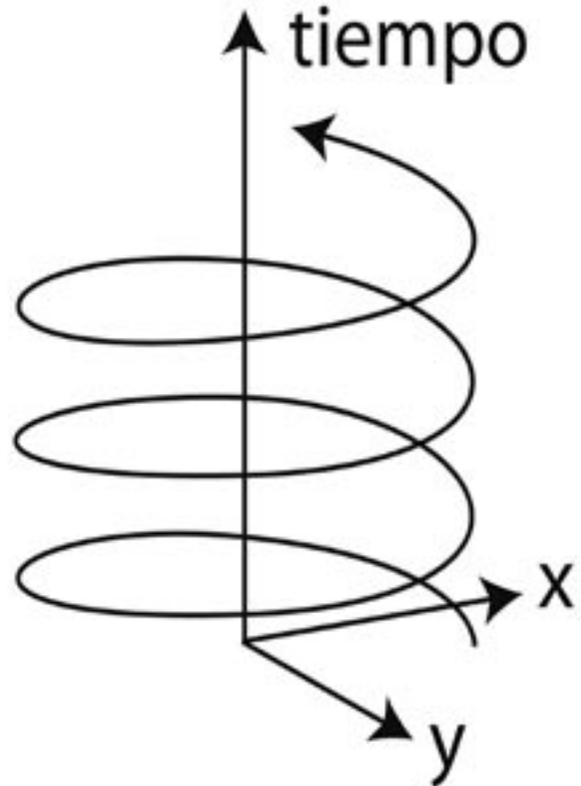
hablar de relojes. Es bastante común ver exposiciones en museos de ciencia de diferentes relojes y de los diferentes mecanismos para medir el tiempo, a lo largo de la historia de nuestra especie. Es impresionante cómo los relojes que estaban sólo en poder de unos cuantos personajes en el pasado, se han vuelto un instrumento que cualquiera puede llevar hoy en la muñeca.

Por un lado, en el desarrollo científico y tecnológico, está la capacidad de medir el tiempo cada vez con más precisión. Sin embargo, por otro lado, el propio concepto del tiempo ha ido cambiando a medida que sabemos más. También han surgido nuevas preguntas, como siempre sucede cuando avanza el conocimiento. Es importante hacer notar que en la llamada física clásica de Newton, la que aprendemos en la preparatoria, no hay una direccionalidad en el tiempo. Las ecuaciones que describen el movimiento son simétricas e iguales si el tiempo avanza o retrocede. Sin embargo, nosotros sabemos bien que el tiempo tiene una direccionalidad y nunca amanece siendo más jóvenes que el día anterior. Esta direccionalidad en el tiempo, la llamada flecha del tiempo, la da la segunda ley de la termodinámica. Ciertos fenómenos suceden en un orden, un orden

irreversible. Esto está relacionado con el concepto de entropía y en un sistema aislado la entropía aumenta y eso define la orientación temporal. Si se rompe un objeto lo hace en mil pedazos, la entropía aumenta, la posibilidad de que caiga igual que era antes de la rotura es tan pequeña, que nunca sucede, esta falta de reversibilidad da la direccionalidad en el tiempo. En el estudio de los sistemas fuera del equilibrio, de los sistemas vivos, la irreversibilidad se considera una característica del tiempo (para leer más sobre termodinámica y la entropía, se sugiere leer las contribuciones de Francois Leyvraz del 21 y 28 de diciembre de 2009, pág. 67 y 69 de este libro). Hay también una flecha psicológica del tiempo, pues hay memoria del pasado, pero no del futuro, además se habla de una flecha cosmológica del tiempo, que viene desde la gran explosión y está dada por la expansión del universo.

Antes del siglo XX el tiempo se consideraba absoluto. Es decir, mi reloj marca lo mismo si estoy quieto en una silla o si me muevo a una cierta velocidad. La teoría especial de la relatividad acabó con este absoluto. Los sistemas de referencia inerciales están en reposo o moviéndose con velocidad constante. El principio galileano de relatividad dice que las leyes de la mecánica son equivalentes en sistemas inerciales, es decir, en sistema moviéndose con velocidad uniforme entre ellos. Se pensaba que el tiempo valía lo mismo en ambos sistemas, pero no. Lo que es constante es la velocidad de la luz. Entonces todos los conceptos fundamentales, longitud, masa y tiempo tuvieron que revisarse. El tiempo se dilata cuando aumenta la velocidad, por eso sucede la paradoja de los gemelos. El que se va de viaje a una velocidad cercana a la de la luz, regresa mucho más joven que el que se queda en la Tierra.

Además, la teoría general de la relatividad que se refiere a los sistemas de referencia acelerados, unió al tiempo con el espacio. Una de sus principales características es la curvatura del espacio-tiempo. La gravedad es una consecuencia de esta curvatura. La Tierra no se mueve en una elipse alrededor del Sol, sino en una espiral pues hay una dimensión más: la del tiempo. Ambas teorías, la especial y la general, debidas a Albert Einstein, cambiaron completamente la definición del tiempo.



*La Tierra se mueve alrededor del Sol en una elipse, pero esta elipse se desplaza el tiempo: nunca vuelve a pasar por el mismo espacio-tiempo.*

Para terminar, no hay que olvidar un punto de contacto entre la literatura y la ciencia, esto es la ciencia ficción, donde los viajes en el tiempo son un tema favorito, no necesariamente sustentado en principios físicos. Por ejemplo, recordemos el precioso cuento de Ray Bradbury, "El ruido de un trueno" (*A sound of Thunder*) escrito en 1952. En él, unos cazadores viajan en el tiempo hasta llegar a la prehistoria y sin darse cuenta matan a una mariposa. Cuando vuelven al presente se dan cuenta que el mundo en que se encuentran es totalmente diferente al que conocían. La muerte de esa mariposa provocó un efecto en cadena que impidió la existencia de millones de sus descendientes.



# Los metamateriales y la capa de Harry Potter

**J. Antonio del Río**  
**Julia Tagüeña**

Centro de Investigación en Energía, UNAM, Campus Morelos  
Miembros de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Mientras los cuentos de hadas nos presentan objetos mágicos como la capa de invisibilidad de Harry Potter, la ciencia nos indica el camino tecnológico para conseguir objetos que parecen mágicos. Así, hace unos cincuenta años, era cosa de magia o ciencia ficción el pensar en algún dispositivo pequeño, del tamaño de un reloj en aquel entonces, que nos permitiera comunicarnos a distancia sin alambres. Ahora el uso de los teléfonos celulares es un hecho totalmente cotidiano. Entre otras ramas de las ciencias, la llamada ciencia de materiales es uno de los motores de los avances tecnológicos.

No nos parece extraño que con las letras del alfabeto de cada idioma se construyen todas las palabras que se han dicho y toda la obra literaria de

la humanidad, es decir con menos de 30 letras en nuestro lenguaje se construye el acervo escrito de la humanidad. Análogamente con un poco más de 100 elementos registrados en la tabla periódica se forma toda la materia del Universo, incluidos nosotros mismos. De la misma manera que no parece haber límites a la creación literaria, no los hay a la creación de nuevos materiales. El ser humano juega con la materia y consigue crear materiales con propiedades inéditas, que no existen en la naturaleza.

Ese es el caso de los metamateriales, compuestos exóticos, arreglos periódicos de otros materiales construidos macroscópicamente. Los metamateriales responden de maneras distintas al interactuar con la luz. Todos conocemos el fenómeno de la refracción.



Figura 1. Dentro del círculo está la foto tomada con un filtro de silicio poroso. Observa que la imagen es ahí más nítida (Foto:CIE-UNAM).

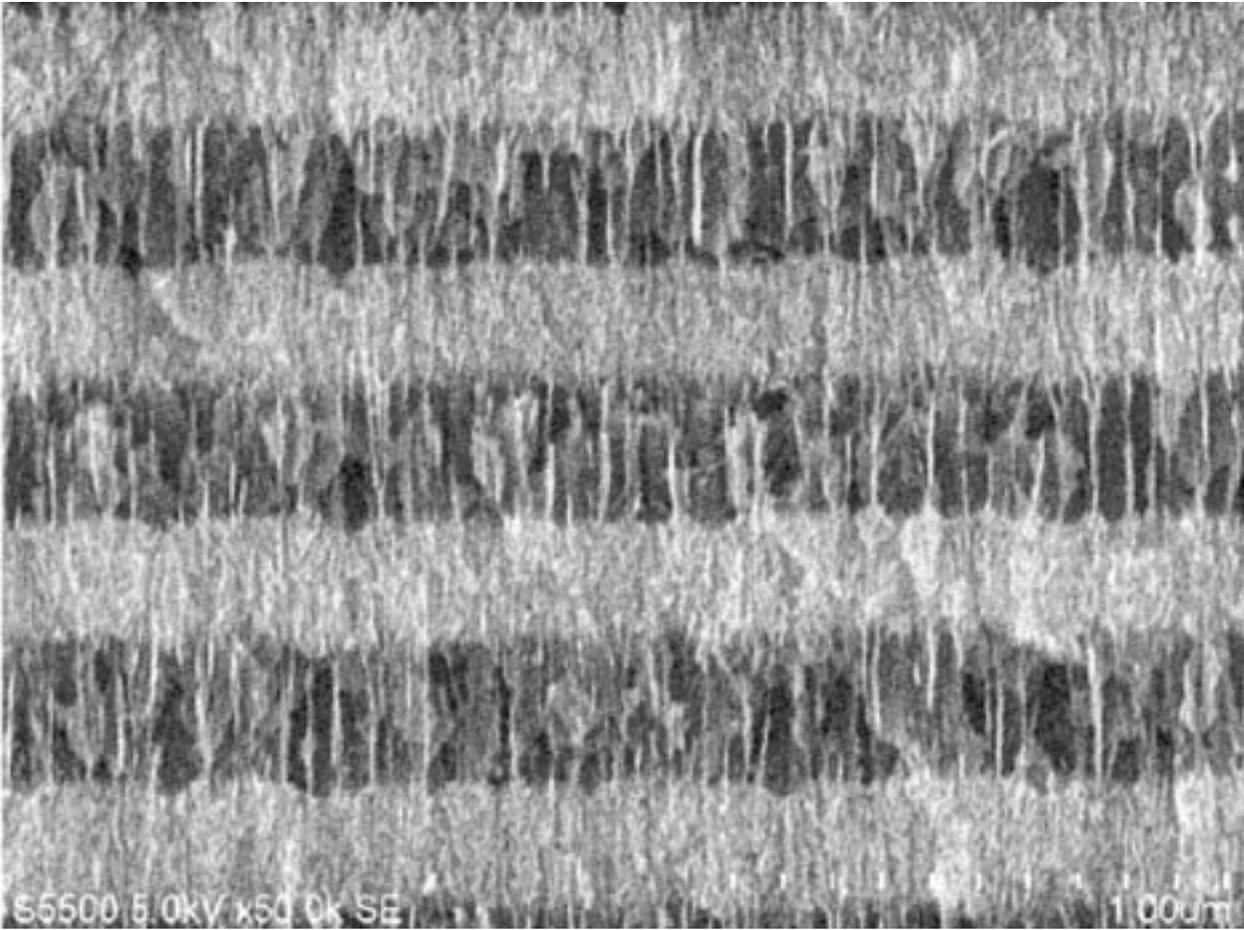


Figura 2. Imagen de microscopía electrónica de barrido de multicapas de silicio poroso obtenida en el Centro de Investigación en Energía de la UNAM, en Temixco, Morelos.

Hemos visto cómo parece que la luz se dobla al cambiar de medio, por ejemplo al entrar en agua. Lo novedoso de algunos metamateriales es que pueden presentar un índice de refracción negativo, es decir, la luz en ellos se dobla en dirección diferente a la usual. Esto podría permitir alcanzar el famoso sueño de la invisibilidad, construir una capa que vaya refractando a la luz rodeando al objeto escondido. Esta capa hecha con un metamaterial de índice de refracción negativo propiciaría que la luz rodeara el objeto a esconder en forma similar a cuando el agua en un río rodea una roca situada en medio de su caudal. Claramente, las implicaciones de este hecho son enormes.

Sabemos que la electrónica es la tecnología que aplica los conocimientos sobre la conducción de los electrones y que ha permitido construir todos los dispositivos electrónicos actuales. Fue sin duda la revolución del siglo XX. Ahora es la fotónica la que está jugando ese papel. En la fotónica se aplican los conocimientos sobre la conducción de fotones, los componentes de la luz, produciendo dispositivos esta vez fotónicos todavía más rápidos y con mayores capacidades que los actuales electrónicos.

El nombre de metamateriales lo inventó Rodger M. Walser de la Universidad de Texas en 1999, para

describir materiales con “funcionamiento más allá de las limitaciones de los compuestos convencionales”. Esta definición se ha ampliado a ser una nueva clase de compuestos ordenados que tienen propiedades extraordinarias, no observadas en la naturaleza.

Como ya mencionamos, los metamateriales son compuestos ordenados de materiales normales que poseen propiedades diferentes a las usuales. En particular la capa de invisibilidad se fabricaría con un metamaterial compuesto por películas delgadas de materiales ordenados, cada uno con diferente índice de refracción, de tal forma que refracten la luz dentro de ellos en una dirección diferente a la usual, es decir un metamaterial con índice de refracción negativo. Estas películas tendrían el grosor de unas cuantas micras y bien podrían construir la tela de la capa de invisibilidad.

En Morelos en 2004 el grupo de investigación de los autores logró construir una hojuela con un espesor de 60 micras que atrapa la luz por algunos instantes. Actualmente (2010), en colaboración con Rocio Nava y Beatriz de la Mora, integrantes de este grupo, se construyen estructuras fotónicas de silicio poroso, en particular se están diseñando, fabricando y estudiando metamateriales con índice de refracción negativo.

Como ejemplo, las fotografías muestran el efecto de un filtro construido con multicapas nanoestructuradas de silicio poroso (figura 1) y una imagen de microscopia electrónica de barrido de estas multicapas (figura 2). Todos estos son temas de frontera científica que se desarrollan en Temixco, Morelos.

La revista *Nature Physics* que publica lo más nuevo en las ciencias físicas, le ha dado recientemente (septiembre, 2009) la portada a un artículo de los investigadores D. Genov, S. Zhang y X. Zhang de la Universidad Tecnológica de Louisiana, E.U.A., sobre otra posible aplicación de los metamateriales: construir un hoyo negro (ver figura 3). Este grupo de investigadores ha trabajado en construir una “capa de invisibilidad”. Así, ahora, en lugar de diseñar un metamaterial para desviar la luz alrededor de un objeto para que no se vea, se puede atrapar la luz para que no pueda salir. Desde luego el fenómeno físico astronómico es diferente. En el caso de un hoyo negro verdadero, la luz no sale por una gran atracción gravitatoria. Este es un proceso diferente, pero el resultado parece ser el mismo. De esta manera se podría conseguir el sueño de los astrónomos de hacer experimentos en “hoyos negros”, en lugar de tener que esperar a que suceda de manera natural.

Cálculos teóricos sugieren los diseños de los metamateriales para construir estos hoyos negros como combinaciones de cobre y aire y también mezclas con arseniuro de galio, indio con fósforo y aire. La construcción de hoyos negros de silicio poroso en el infrarrojo puede ser una posibilidad que podría manifestarse en Morelos. También se especula con que estos materiales podrían entonces ser almacenadores de energía y tendrían aplicaciones prácticas, como celdas solares más eficientes.

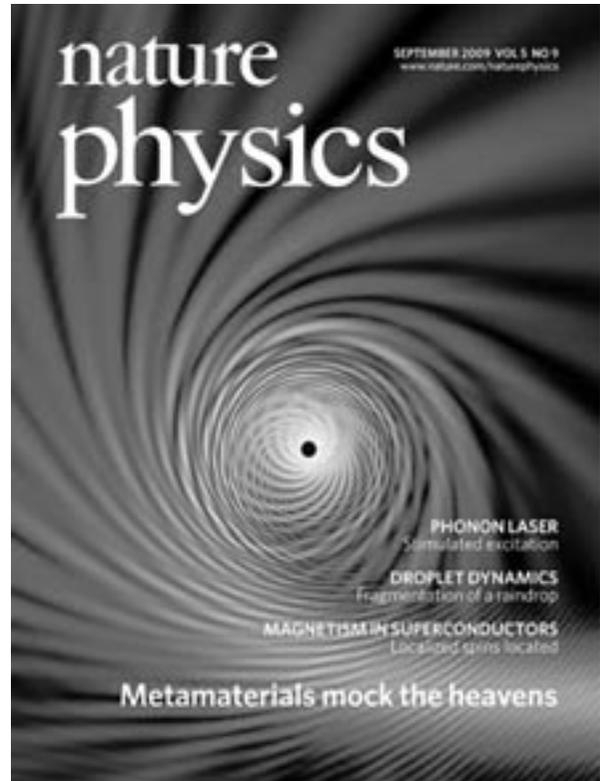


Figura 3. Simulación de la dinámica de un hoyo negro. Portada de la revista *Physics Nature* (Septiembre, 2009), basada en el artículo “*Mimicking celestial mechanics in metamaterials*”, de D.A. Genov, S. Zhang & X. Zhang.

Sin duda, los científicos trabajan en la construcción de materiales con propiedades que se asemejan a cualidades “mágicas”.



# ¿Qué es la termodinámica?

**François Leyvraz**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Hace algunos años, en una pequeña ciudad del Medio Oeste en Estados Unidos, se dieron varias protestas en contra de la segunda ley de la termodinámica. Éstas tomaban su raíz en libros de texto en los que se enseñaba, tal vez de manera algo desafortunada, la posibilidad que el universo terminará en una “muerte térmica”; es decir, en un estado carente de cualquier tipo de estructura y, por lo tanto, de vida. Esto les pareció a varias almas sensibles una blasfemia hacia un Creador todopoderoso, de cuya infinita bondad habían logrado convencerse a tal grado que no podían tolerar la exposición de tales ideas a sus inocentes hijos. Tomaron por ende las calles, pidiendo que no se enseñaran ya semejantes herejías. Al enterarse de este extraño suceso, un amigo mío, muy culto, pero con pocos conocimientos de física, me preguntó:

—Y en esto, ¿cuál es tu opinión?

Externé, como me parecía obvio, que en semejantes asuntos no era posible tener opinión, sino que sólo le quedaba a uno atenerse a los hechos y a las teorías ampliamente verificadas por la experiencia, como lo son, muy seguramente, las leyes fundamentales de la termodinámica.

—Pero ¿no hay posibilidad de tener opiniones propias? ¿No hay lugar para que cada cual tenga una visión individual de las cosas? ¿No es, como lo dicen algunos, un acuerdo social en la comunidad de los físicos que determina qué leyes supuestamente rigen la naturaleza? Y si es así, ¿qué derecho tienen ustedes a imponer su enfoque particular a personas que desean vivir con otros puntos de vista, como lo es el religioso?

—Me parece —le dije— que estamos confundiendo varios niveles de la realidad. La termodinámica, en sus orígenes, se desarrolló para describir el desempeño de las máquinas de vapor. En esto ha sido extraordinariamente exitosa. Sus aplicaciones en el mundo de hoy son innumerables: no dudo ni por un instante que aquellos que estuvieron protestando contra la segunda ley, la están aprovechando cada día en los motores de sus automóviles, en sus refrigeradores o cuando disfrutan del aire acondicionado.

—Probablemente necesito que me lo expliques un poco —me contestó—. Siempre había creído que la termodinámica era algo muy desvinculado de la realidad concreta, algo que tiene que ver con información, y con un significado mucho más profundo de lo que corresponde a máquinas de vapor o refrigeradores.

—Primero hagamos una aclaración —le respondí—

. Si un concepto explica un dato real de manera sencilla y precisa, entonces éste es tan profundo como necesita serlo. Explicar cómo funciona un refrigerador es importante, entre otras cosas porque sólo así se podrá diseñar uno mejor. Lograr esto con pocas ideas sencillas es el ideal de la ciencia, que en pocos casos se ha realizado tan perfectamente como en la termodinámica. El afán de ser profundo a expensas de la sencillez es del todo ajeno a la ciencia. Si a veces no parece así, es que la ciencia tiene un cierto vocabulario técnico, que muchos no dominan. Pero en lo básico, las ideas importantes suelen ser sencillas.

¿Podrías entonces explicarme esta idea de manera que la entienda? me preguntó.

Bien, lo intentaré —contesté. El tema de la termodinámica es la manera en que la energía puede fluir de un lugar a otro.

¿Flujo de energías? No me esperaba semejante misticismo de parte de un científico...

Por nada, contesté riendo. La energía, en física, es una medida de lo que se puede realizar con ciertos medios. Por ejemplo, si tengo una palanca, puedo levantar un gran peso con poco esfuerzo. La energía es una manera de medir el esfuerzo que resulta independiente de los medios que use: no importa qué sistema de palancas o poleas emplee para levantar un peso a determinada altura, la energía que requiero para hacerlo es siempre la misma.

¿Puedo decir, entonces, que la energía es una manera invariable de expresar en números la cantidad de esfuerzo, o de trabajo que se requiere para lograr determinada tarea?

Exactamente, le contesté, lo has expresado de forma muy apropiada. Ahora bien, una palanca sirve para pasar energía mecánica de manera eficiente de mi brazo al cuerpo que estoy levantando.

Y de algo similar, entonces, ¿trata la termodinámica?

Sí, pero con una diferencia importante: de lo que trata la termodinámica es el uso de la energía que aparece en forma de calor. La primera máquina que usó la “potencia del fuego” de manera útil fue la máquina de vapor.

Las máquinas de vapor ¿son entonces como palancas que usan una energía que hubiera en forma de calor?

De algún modo, sí. Pero aquí es donde hay una diferencia básica entre las máquinas que usan calor y las otras: por ejemplo, en una máquina que usa sólo energía mecánica, o que convierte energía mecánica en eléctrica, siempre es posible, en principio, realizar

la conversión de energía a una eficiencia del 100%. La fricción entre las partes causa dificultades técnicas pero, en principio, se pueden reducir más allá de cualquier límite.

Y supongo que me dirás que la termodinámica y su segunda ley, ¿hacen imposible una eficiencia de 100% en máquinas que involucran el calor?

Precisamente, contesté. Para una máquina que usa calor, es necesario hacer pasar el calor de una fuente de temperatura alta a otra de temperatura baja si queremos obtener cualquier provecho del calor.

Bien veo, contestó, que un motor realiza parte de su operación a una temperatura alta, pero no veo dónde se requiere otra temperatura baja.

Se requiere, le contesté, porque el mundo que nos rodea, con su temperatura baja, hace posible que un gas caliente se expanda y actúe con fuerza sobre el émbolo...

¡Ya lo veo! Exclamó: si la temperatura de ambos lados del émbolo fuera la misma, éste no tendría motivo alguno de moverse de un lado más que del otro. Así que lo importante para que funcione es la asimetría en las temperaturas.

—Exactamente, pero hay más: la segunda ley no nos habla sólo de motores, sino de procesos físicos arbitrarios. Afirma, por un lado, que ningún proceso puede desarrollarse cuando todas las temperaturas son iguales y, por otro lado, afirma que todos los procesos tienden a igualarlas.

—Entiendo: si representamos al universo entero como si fuera una gran máquina, esta constante igualación de las temperaturas debería acabar por llevarnos a un estado de cosas en equilibrio termodinámico total, donde, por lo tanto, ninguna actividad sería realizable.

—Así es lo que a veces se dice, y son éstas las ideas que llevaron a las protestas que discutíamos al principio de esta conversación. Sin embargo, no se debe tomar esto demasiado en serio: hay muchas cosas que no sabemos acerca del universo, y no es para nada obvio que se le puede equiparar a una máquina. En particular, la naturaleza de la gravedad hace dudar si se puede realmente aplicar la termodinámica al universo entero. Existe aún cierta incertidumbre sobre lo que le sucederá a nuestro Universo después de mucho tiempo; pero ésta tiene su origen en nuestros conocimientos de las leyes de la física: no nos apoyamos en juicios



acerca de las intenciones de un Creador que nos son, por necesidad, totalmente ocultas.

Sin embargo, preguntó mi amigo, me quedan todavía muchas dudas: ¿por qué el calor tiene esta naturaleza tan particular y diferente de las otras formas de energía? Y ¿qué es, a fin de cuentas, ese otro concepto que se llama entropía? ¿Es un concepto abstracto, o puede medirse?

A lo que yo contesté: mi explicación fue muy escueta, y espero que nos volvamos a encontrar pronto para dilucidar tus dudas.

En una segunda contribución continuará la historia..

NOTA: una versión de este texto fue publicada previamente en el libro "CIENCIA Y FICCIÓN. Antología de un taller de redacción" (K. Cedano y F. Rebolledo, compiladores) (2009), editado por el Campus Morelos de la UNAM con apoyo del CCyTEM.

# ¿Qué es la entropía?

**François Leyvraz**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

En ocasión anterior había hablado en este espacio de una conversación que sostuve con un amigo sobre la naturaleza del calor, de las máquinas y algunos temas de termodinámica. Al verme de nuevo, mi amigo me preguntó si ahora tenía algo de tiempo para aclarar algunas dudas que le habían quedado en nuestra última charla, en particular, sobre la entropía. Le contesté que lo intentaría. Me preguntó entonces si le podía dar una idea aproximada de lo que era la entropía. Más aún, me preguntó si la entropía era algo real, que pudiera medirse, o sólo alguna idea abstracta.

Es una idea abstracta, contesté, pero se define de tal manera que puede medirse. Para definir la entropía requerimos de tres conceptos: la temperatura, el calor y la reversibilidad.

Vamos por partes: la temperatura es algo que siempre se encuentra igual para dos cuerpos que pueden intercambiar calor. Un trozo de hierro y otro de madera que quedaron cierto tiempo en un cuarto tienen ambos la misma temperatura. Esto no corresponde necesariamente a nuestro sentido subjetivo de lo que es caliente o frío: en este caso, el hierro parecerá más frío que la madera, pero en realidad ambos tendrán la misma temperatura.

—Esto me parece razonable —me dijo—, pero hasta ahora, sólo me has dicho cómo saber cuándo dos temperaturas son iguales. ¿Cómo, con lo que me dijiste, puedo determinar el intervalo entre dos temperaturas distintas? y, ¿de qué manera puedo determinar una escala de temperaturas?

—En realidad —respondí— ésta es una pregunta difícil, y no la puedo contestar bien aquí. Existe una escala natural de temperatura determinada por el comportamiento de los gases a baja presión. Ésta es siempre mayor que cero, y se anula a 273.16 grados centígrados debajo de cero.

El calor, por otro lado, es una forma de energía: si recordamos que hay varios tipos de energía (cinética, potencial, eléctrica, química...), veremos que la energía total a veces disminuye de manera inexplicable. Esto es un tanto extraño ya que, de manera general, la energía se conserva. Por ejemplo, al dejar caer un huevo al suelo, la energía que dio lugar al movimiento de caída del huevo no aparece en ningún lugar obvio después de que el huevo se estrelle. Resulta que toda energía que parece perderse se encuentra bajo la forma de calor, y tiene el efecto de hacer subir la temperatura: el huevo se calienta un poco al estrellarse. En el siglo XIX, Joule hizo un gran número de experimentos para comprobar esto, y en todos encontró que la energía

mecánica de un kilogramo cayendo de una altura de 425 metros basta para calentar un litro de agua en un grado centígrado; en otras palabras, esta energía es siempre la misma cantidad de calor, con lo que se llega a la idea de que calor es energía, pero en una forma en la que no se puede aprovechar de manera directa.

—Pero, entonces, ¿no será el calor un mero comodín introducido por los físicos para hacer que se conserve la energía? ¿No se tratará de una pura convención usada entre físicos, pero sin base real?

—No realmente —le contesté—. Estás pasando por alto un dato básico: los cambios de temperatura nos permiten medir los cambios de calor de manera objetiva. No decimos que el calor aumentó sólo porque perdimos algo de energía: los experimentos de Joule siguieron, con mucha precisión, tanto los cambios de temperatura como la energía añadida, para llegar a la conclusión que el calor correspondiera realmente a la energía faltante.

Ahora llegamos a otra idea esencial: la reversibilidad. Un proceso es reversible si se puede recorrer en el sentido opuesto, es decir, si al pasar el video que se tomó del proceso, no se puede estar seguro en qué sentido va la película. Abrir una lata de refresco sacudida, por ejemplo, no es reversible: nunca sucede que el refresco, del que uno tiene toda la cara empapada, se junte ordenadamente para entrar en la lata que tengo en la mano; el proceso inverso, sin embargo, es muy fácil de realizar. Otro ejemplo de un proceso irreversible se muestra en la figura del florero roto. Por otro lado, dejar que un gas se expanda, aprovechando el proceso para levantar un peso, es reversible, ya que se puede hacer bajar el peso para volver a comprimir el gas. Muchos procesos reales son aproximadamente reversibles.

Ahora ya tenemos todos los elementos para definir la entropía: cuando se pasa reversiblemente de un estado a otro, el incremento de la entropía es el incremento de calor dividido entre la temperatura.

¿Cuál será la ventaja de semejante definición —preguntó mi amigo—. ¿No basta ya con temperatura y calor? ¿De qué me sirve esta nueva definición?

—Su utilidad es la siguiente: La Segunda Ley de la Termodinámica ahora dice que el incremento de entropía no depende del camino que se usa para llegar de un estado a otro. En particular, muchas máquinas funcionan de manera cíclica, es decir, al final de un determinado número de pasos, la máquina regresa a su estado inicial. Para semejante máquina, la entropía al final de un ciclo debe ser la misma que al principio.



Ilustración de un fenómeno irreversible (elaborada por Guillermo Escamilla).

—Tal vez no lo entienda bien —me dijo—, pero me lo estoy imaginando de la manera siguiente: el calor tiene un “valor entrópico”, que es pequeño cuando la temperatura es alta y grande cuando es baja. En otras palabras, puedo sacar mucho calor a alta temperatura, por la misma entropía que corresponde a poco calor a temperatura baja.

—Tienes toda la razón —le dije—, es exactamente como dices.

—Entonces, ¿será posible hacer negocio con el calor, comprando barato y vendiendo caro? Por ejemplo, podría tomar, al principio de un ciclo, cierta cantidad de entropía de una fuente de alta temperatura, luego desecharla a temperatura más baja, para finalmente regresar al principio otra vez. En total habría entonces ganado calor. Me parece que lo estoy sacando de la nada, lo que no puede ser.

—Y no obstante tienes razón: sí se puede —le contesté—. Lo que pasa es que estás confundiendo calor y energía: el calor es una de las formas de la energía, pero existen muchas otras, en particular la que se expresa en trabajo mecánico. Podemos decir que la energía es calor cuando la observamos pasar de un sistema a otro, pero una vez que llega, es energía nada más: no se puede decir si será calor o trabajo...

—Ya entendí —me interrumpió—. Lo que pasa en el sistema que describí, es que saqué energía de la fuente de temperatura alta, puse una parte en forma de calor a la temperatura inferior y me quedé con un sobrante de energía para efectuar trabajo. Pero ¡me parece que esto es de gran utilidad práctica! Si esta máquina funciona cíclicamente, puede seguir suministrándonos trabajo para siempre.

—¡Felicidades! —le dije—. El procedimiento que describes es, de hecho, la base del mecanismo de casi todos los motores que se usan. La máquina de vapor

así funciona, y también los varios tipos de motores de vehículos: sean de dos o de cuatro tiempos, de gasolina o diesel. El refrigerador, dicho sea de paso, funciona de la misma manera, pero al revés...

— ¡Lo veo!- Se debe quitar calor al refri y depositarlo en la cocina. Como el calor de baja temperatura es entrópicamente caro, es malo el negocio. Por esto debo poner energía de mi parte, que es la que me cobra la compañía de electricidad.

—Pero sigo con una duda —prosiguió—: hasta ahora me has dicho lo que pasa con la entropía en procesos reversibles. ¿Qué pasa en el caso de cambios irreversibles? He oído que la entropía siempre crece y, hasta ahora, sólo me has dicho que se mantiene constante en un ciclo. ¿Qué hay de verdad, entonces, en esto del crecimiento de la entropía?

—Ésta es la otra vertiente de la Segunda Ley: se afirma que no puede existir máquina cíclica alguna que opere a una sola temperatura. En otras palabras, no es posible sacar calor de una sola fuente y convertirlo íntegramente a trabajo. De hecho, resulta que los procesos reversibles son los más eficientes.

—Parece probable que la irreversibilidad en general resulte desventajosa, me contestó. Creo entender ahora que la entropía sí es algo bien definido. Sin embargo, no veo conexión alguna con la información y otros conceptos generales. ¿Será cierto que hay una conexión?

Sí la hay, contesté. Pero esto deberá ser objeto de otra plática.

NOTA: una versión de este texto fue publicada previamente en el libro “CIENCIA Y FICCIÓN. Antología de un taller de redacción” (K. Cedano y F. Rebolledo, compiladores) (2009), editado por el Campus Morelos de la UNAM con apoyo del CCyTEM.

# Las canicas voluntariosas

De cómo un grupo de curiosas y arriesgadas canicas consiguen un efímero estado fuera de equilibrio, en un vano intento por violar la segunda ley de la termodinámica

**J. Antonio del Río**

Centro de Investigación en Energía, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A.C.

En una caja cerrada habitaba una población de canicas azules. Era una población muy democrática y energética. Todas interactuaban de la misma manera entre ellas, intercambiando su energía en una forma dependiente de su cercanía: mientras más cercanas, el intercambio de energía era más intenso. La energía de las canicas se manifestaba en su velocidad al moverse por la caja: mientras más energía tenían, más rápido se movían y deambulaban sin rumbo fijo; ya que al interactuar transmitían o recibían pequeñas porciones de energía que llamaremos térmica. En la caja veíamos una población agitada que se movía constante y vigorosamente. Como era una caja cerrada y nada entraba ni salía, no había forma alguna de que la energía se disipara y, por lo tanto, se conservaba. En unos momentos, una canica tenía una gran velocidad, y debido a la interacción con las otras, en otros momentos tenía una velocidad menor; pero en promedio podríamos decir, que se repartían la energía democráticamente. Parecía que todas las canicas gozaban moviéndose e intercambiando la energía. El gozo radicaba en disfrutar las diferentes posibilidades de estar en la caja: de repente, en la esquina superior



derecha había canicas lentas; un instante después, éstas eran sustituidas por un grupo que jugueteaba con gran dinamismo. Situaciones similares ocurrían en cada porción de la caja. La energía térmica era tan grande que los movimientos eran rapidísimos comparados con los movimientos de los humanos. Por esta razón, cuando los humanos se asomaban a la caja no podían distinguir las diferentes posibilidades de movimiento de las canicas: lo único que lograban ver





eran muchas canicas uniformemente distribuidas en la caja y moviéndose todas con velocidades similares. Las canicas gozaban de este estado, que los humanos llamaron de equilibrio.

Un día, Azulina quiso moverse lo más rápido posible, para lo cual requería de hacerse de toda la energía de las demás canicas. Se propuso convencer a sus compañeras de que le proporcionaran toda su energía. Como eran democráticas y además curiosas, votaron a favor de otorgarle su energía a Azulina y observar qué sucedía. Sin embargo, debido a su naturaleza democrática y de interacción a distancia, en el momento en que Azulina recibía la energía de las demás la transmitía a sus vecinas más cercanas. Todas luchaban fervientemente para pasarle la energía a Azulina; pero se les revertía. Después de un largo periodo de tiempo, Azulina les pidió que se alejaran lo más posible de ella para que en una esquina pudiera recibir toda la energía posible. Con esta petición, el intercambio de energía entre el resto de las canicas y Azulina se volvió complicado, ya que Azulina recibía solamente pequeñas porciones de energía debido a la lejanía de las demás canicas. A pesar de esto, por un efímero y maravilloso instante, lograron que casi toda la energía fuera transmitida a Azulina y sólo una porción muy pequeña permaneciese repartida entre el resto; pero el intercambio democrático continuaba vibrante entre ellas repartiendo la energía, conduciéndolas inexorablemente al equilibrio. Ante este comportamiento dinámico azulino, lucharon, sin triunfar, todas las canicas. Nunca pudieron lograr que Azulina fuera superveloz.

Otro día Aniluzza, una canica que tenía propiedades cuánticas, salió de la caja a través de un efecto túnel y se topó con un libro de física estadística. En la primera ojeada encontró que la segunda ley de la termodinámica implica que una situación en la que Azulina tuviera toda la energía de las demás canicas era prácticamente imposible, ya que esta situación constituía solamente una configuración entre más de un billón de billones de configuraciones posibles y, por lo tanto, era prácticamente imposible de lograrse. Este hecho desconcertó a Aniluzza, ya que en el texto encontró también que la segunda ley de la termodinámica implica que al poner en contacto dos

cuerpos, uno frío y otro caliente, siempre el frío se calienta, gracias a que el caliente se enfría; y nunca de manera espontánea el caliente se calienta más para que el frío se enfríe más. Al continuar leyendo, entendió que precisamente las canicas bajaban su temperatura al tratar de darle su energía a Azulina, y que ésta, al incrementar su velocidad incrementaba su temperatura; ésa era la razón por la cual Azulina no podía tener toda la energía: no podía tener toda la energía térmica y enfriar más a las ya de por sí frías canicas. Aniluzza quiso regresar a la caja para contarle a sus amigas, pero antes estuvo pensando y repasando todo lo que habían hecho para lograr que Azulina tuviera toda la energía. En eso recordó el instante en que casi lo lograron. Una configuración casi imposible donde casi toda la energía había estado con Azulina.

De repente Aniluzza concibió una idea y de regreso a la caja, haciendo honor a su nombre, les propuso a sus compañeras que todas invirtieran la dirección de su velocidad para regresar a ese momento maravilloso. Las canicas convencidas de que ese cambio en la dirección era una forma más sencilla de alcanzar la tan anhelada configuración de una supervelocidad para Azulina, rompieron algunas leyes de la física, pero no la segunda ley de la termodinámica, e invirtieron su velocidad. Algún tiempo después se encontraron en las posiciones de la configuración donde casi lo habían logrado, Azulina casi tenía toda la energía. Las canicas festejaron, pero solamente por un instante y después, de volver a vivir ese glorioso momento, regresaron a su agitado danzar por todos los confines de la caja repartiendo democráticamente la energía con gran tenacidad. Con este ejercicio las canicas mostraron que solamente bajo su acción voluntaria podían lograr un instante de no equilibrio y, efímeramente, durante ese fugaz instante, dar la impresión de que la segunda ley de la termodinámica no importaba.

El lector podrá encontrar más información relacionada con la segunda ley de la termodinámica en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Segunda\\_ley\\_de\\_la\\_termodinámica](http://es.wikipedia.org/wiki/Segunda_ley_de_la_termodinámica), "El largo brazo de la segunda ley", J. Miguel Rubí, Revista Investigación y Ciencia, Febrero 2009, "Introducción a la termodinámica", L. García Colín, Trillas y cualquier otro libro de termodinámica.

# ¿Qué es la biofísica?

**Ramón Garduño Juárez**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

La Biofísica es una disciplina de investigación científica afín a los estudiantes de Física e Informática que están interesados en aplicar sus conocimientos a la Biología, así como para los estudiantes con una base biológica interesados en la instrumentación, cómputo, y los aspectos físicos de los sistemas biológicos. La Biofísica intenta explicar las funciones biológicas en términos de estructuras moleculares y de las propiedades de moléculas específicas. El tamaño de estas moléculas varía dramáticamente, desde pequeños ácidos grasos y azúcares (de aproximadamente un nanómetro, abreviado “nm” y que es igual a  $10^{-9}$  m, o sea, la mil millonésima parte de un metro), hasta moléculas como proteínas (5-10 nm), almidones (mayores a 1000 nm) y las enormemente alargadas moléculas de ADN (cuya longitud es mayor que 10,000,000 nm = 1 cm, pero cuyo ancho es de sólo 20 nm).

Estas moléculas son las unidades con las que se ensamblan las células para construir los tejidos y organismos enteros. Muchas de éstas forman estructuras complejas de dimensiones del orden de 10, 100, 1000, 10,000 nm e incluso más grandes. Por ejemplo, las proteínas de la leche se ensamblan para formar micelas de caseína, las cuales a su vez se agregan para formar el suero del queso; las proteínas y los ácidos ribonucleicos se ensamblan para formar los ribosomas, los organelos que fabrican proteínas en el interior de las células; los lípidos y los proteínas se ensamblan para formar las membranas celulares, que constituyen las barreras externas y las superficies internas de las células; las proteínas y el ADN se enrollan para formar cromosomas, los portadores del código genético; y así sucesivamente.

Los problemas biológicos que estudia la Biofísica son tan diversos como los organismos vivos:

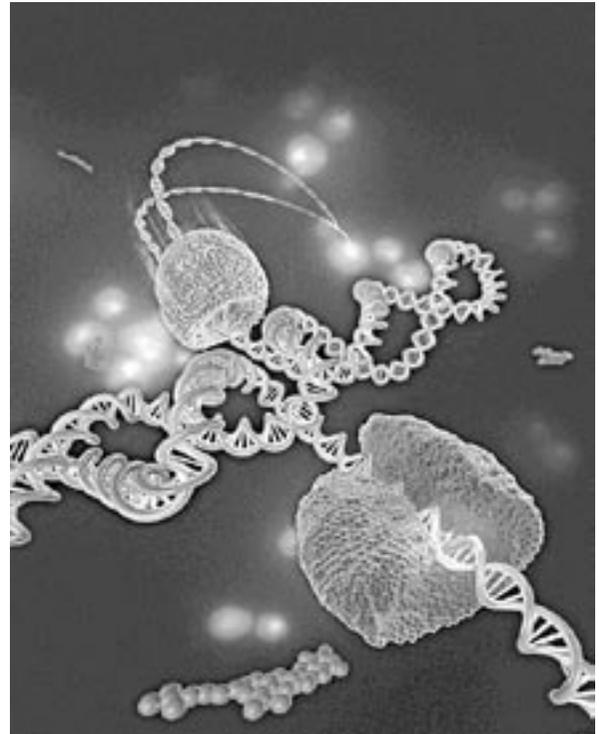
- ¿Cómo se pliegan polímeros lineales, formados solamente por 20 aminoácidos diferentes, para formar proteínas con estructuras tridimensionales precisas y con funciones biológicas específicas?
- ¿Cómo una gigantesca molécula de ADN se desenrolla y se replica exactamente a sí misma durante la división celular y cómo dirige la producción de proteínas?
- ¿Cómo el sonido, la luz, los aromas, los sabores, y los contactos son detectados por los órganos sensoriales y convertidos en impulsos eléctricos que proveen al cerebro de información sobre el mundo exterior?
- ¿Cómo convierte una célula muscular la energía química de la hidrólisis del ATP en fuerza mecánica y

movimiento?

•¿Cómo hace la membrana celular, una barrera de lípido impermeable a moléculas solubles en agua, para transportar selectivamente tales moléculas a través de su interior hidrofóbico?

La Biofísica intenta responder estas preguntas usando un enfoque multidisciplinario. Las moléculas específicas que participan en los procesos biológicos se identifican usando las técnicas del análisis químico y bioquímico. Las interacciones y estructuras moleculares se determinan usando técnicas espectroscópicas de la Física y la Química. Por último, la relación entre la función biológica y la estructura molecular se investiga usando instrumentos físicos altamente precisos y sensibles, así como utilizando técnicas que son capaces de monitorear las propiedades o el movimiento de grupos específicos de moléculas o, utilizando técnicas capaces de visualizar y manipular moléculas individuales. La Biofísica explica funciones biológicas en términos de mecanismos moleculares: descripciones físicas precisas de cómo moléculas individuales trabajan juntas como pequeñas máquinas para producir funciones biológicas específicas.

Inevitablemente la enseñanza y práctica de la



*Representación artística de la reparación y duplicación del ADN.*



Biofísica se circunscriben en tres áreas básicas, a saber: Estructuras moleculares, Técnicas Biofísicas y Mecanismos Biofísicos. Cada una de estas áreas se describe brevemente en los párrafos siguientes.

**Estructuras Moleculares.** La Biofísica explica las funciones biológicas de las células, los tejidos y los organismos en términos de la estructura y comportamiento de las moléculas biológicas. Por ejemplo, los genes son un reflejo de la estructura molecular de la cadena lineal extraordinariamente larga del ADN del cual están hechos. El comportamiento de las enzimas, las hormonas, y los anticuerpos es un reflejo de las estructuras moleculares de las proteínas y de la química orgánica de los grupos funcionales de las cadenas de los aminoácidos. La superficie y las propiedades selectivas de las membranas biológicas (presentes en todas las células) son el reflejo de la habilidad de los lípidos a agregarse en bicapas



*Estructura de la proteína (albúmina) presente en la sangre humana y moléculas (ligandos) con los que interacciona.*

flexibles donde los grupos hidrófobos apuntan hacia adentro de la célula y los grupos polares hacia afuera de ellas. Para ello varios grupos de investigación han establecido bancos de datos de estructuras moleculares tales como el Protein Data Bank, el Universal Protein Resource, el GenBank, el Nucleotide Sequence Database y el Lipid Data Bank.

**Técnicas Biofísicas.** La caracterización de la estructura molecular, la medición de las propiedades moleculares, y la observación del comportamiento molecular presentan un desafío enorme para los científicos especializados en la Biología. Una amplia variedad de técnicas biofísicas se han desarrollado para el estudio de moléculas en cristales, en disolución, dentro de las células, y aún dentro de organismos vivos. Estas técnicas proveen información acerca de la estructura electrónica, tamaño, forma, dinámica, polaridad, y modos de interacción entre las moléculas biológicas. Algunas de las técnicas más sorprendentes proveen imágenes de las células, las estructuras subcelulares, y aún de moléculas individuales. Hoy en día es posible, por ejemplo, el observar directamente el comportamiento biológico y propiedades físicas de una sola molécula de proteína o de ADN dentro de una célula viva y determinar cómo el comportamiento de una sola molécula puede tener influencia en la función biológica de todo el organismo.

**Mecanismos Biofísicos.** Gran parte del éxito de la Biofísica se debe a su habilidad de desarrollar mecanismos físicos detallados para explicar procesos

biológicos específicos. Por su importancia, entre éstos podemos mencionar el comportamiento eléctrico de las células, la transformación de energía eléctrica a energía química en las membranas biológicas, la catálisis enzimática, la selectividad molecular inherente al proceso inmunológico, la movilidad celular, las contracciones musculares, el proceso mediante el cual se pliegan las proteínas, los procesos mediante los cuales oímos, vemos, olemos y sentimos y el proceso mediante el cual se controla la información genética contenida en las moléculas de ADN y su importancia en el control de enfermedades moleculares como el cáncer. El poseer estos conocimientos, y de otra variedad de mecanismos biofísicos, tiene un potencial ilimitado para la inventiva humana en general, y en particular para la investigación biomédica.

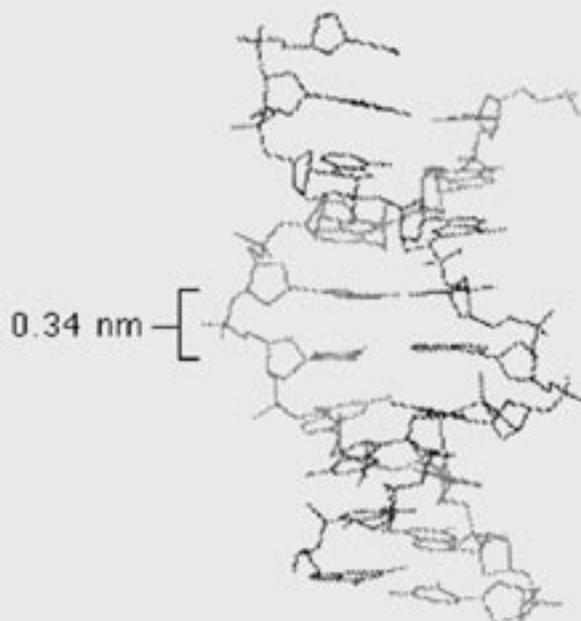
La Biofísica es mucho más que simplemente un campo del conocimiento científico. Es también una carrera excitante para miles de hombres y mujeres de todo el mundo. Los biofísicos trabajan en bachilleratos y universidades, en centros médicos e institutos de investigación, en compañías farmacéuticas y biotecnológicas, así como en agencias gubernamentales y en fundaciones independientes. Su trabajo incluye desde investigación fundamental sobre el mecanismo de acción de medicamentos contra el cáncer, del desarrollo de métodos novedosos para medir la concentración de glucosa en diabéticos sin tener que recurrir al sangrado, en cómo restablecer las conexiones nerviosas en personas que después de un accidente quedan paráliticos, hasta la investigación aplicada para lograr hacer “ver” a los ciegos.

## El tamaño del ADN en el cuerpo humano

Si consideramos que cada célula contiene un conjunto de cromosomas que a su vez contienen cerca de 6,000 millones de pares de bases (pb), que a la distancia entre dos pares de bases es de 0.34 nanómetros (ver figura) o  $10^{-9}$ m y que en el cuerpo hay cerca de  $10^{13}$  células, entonces la longitud total en kilómetros del ADN en el cuerpo se puede calcular de la siguiente multiplicación:

(longitud entre pb) x (número de pb por célula) x (número de células en el cuerpo)

El resultado de esta multiplicación es de 20,400 millones de kilómetros. Para poner este inmenso número en perspectiva, diremos que si la distancia promedio entre la Tierra y el Sol es de 150 millones de Km, la longitud aproximada de todo el ADN del cuerpo humano es equivalente a 135 viajes de ida y vuelta de la Tierra al Sol.





# ¿Qué hacen los biofísicos?

**Ramón Garduño Juárez**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

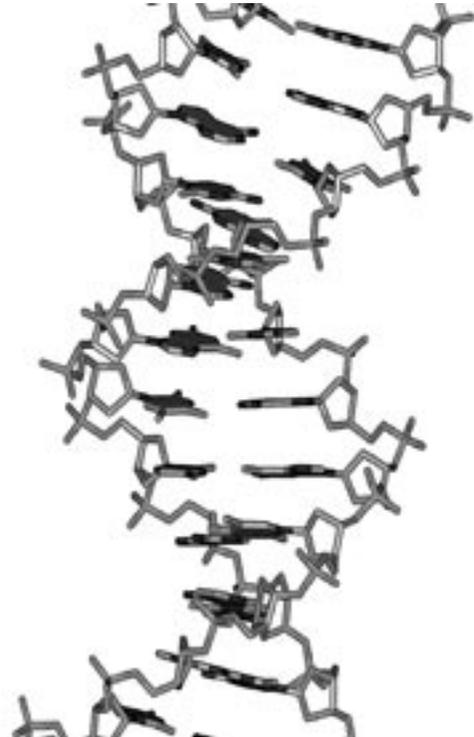
Los orígenes de la Biofísica se remontan a los Griegos y a los Romanos quienes fueron los primeros en desarrollar hipótesis tentativas acerca de las bases físicas de la conciencia y de la percepción. Durante el Renacimiento en Italia, el artista da Vinci y otros investigaron los mecanismos de la locomoción animal. Durante los siglos XVIII y XIX, Galvani descubrió que la electricidad hace que los músculos se contraigan, Young experimentó con lentes, y Mayer y Helmholtz investigaron las relaciones entre el trabajo, el calor y la energía. La Biofísica Matemática se desarrolló rápidamente en los primeros años del siglo XX cuando Thompson analizó la geometría de las formas animales, y cuando Haldane y otros estudiaron la dinámica química de las células. El trabajo de Nerst con celdas voltaicas durante el mismo periodo proveyó las bases de los estudios modernos de los potenciales de membrana y de los canales iónicos, que regulan desde la activación neuronal hasta la contracción muscular.

El campo de la Biofísica Molecular surgió al final de la Segunda Guerra Mundial cuando un grupo de físicos atómicos se interesaron en los procesos biológicos, que les llevaron a descifrar la

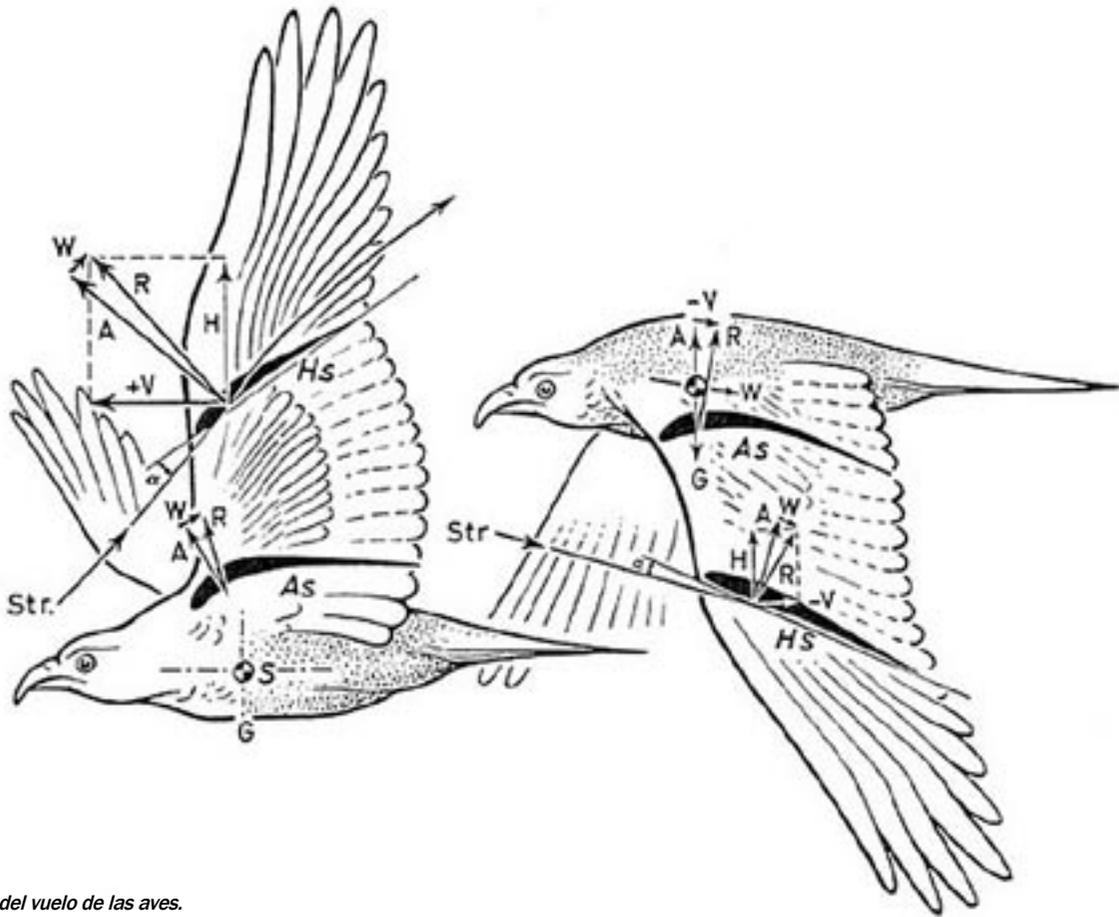
estructura de la vitamina B12, la penicilina, diversas proteínas y del ADN en 1953 por Watson y Crick. La Biofísica Molecular tiene componentes estructurales e informativos. El enfoque informativo enfatiza la transmisión de la información genética dentro de un organismo y de generación en generación, mientras que el enfoque estructural estudia las estructuras de las biomoléculas y ensambles biomoleculares y la relación que estas estructuras tienen con la función biológica. Entre 1945 y 1970 los nuevos métodos físicos que se desarrollaron permitieron que se acelerara la marcha del descubrimiento. La ultracentrifugación analítica permite la separación de las moléculas dentro de un campo centrífugo en base a su tamaño. La electroforesis separa las moléculas de acuerdo a su carga. Los métodos espectroscópicos, como la resonancia magnética nuclear, revelan detalles de la estructura al detectar las interacciones que sufre la materia con la radiación electromagnética. El desarrollo de una electrónica muy sofisticada permite estudios detallados de los potenciales de acción en membranas y canales iónicos. La cristalografía de rayos-X hace posible el ver las estructuras tridimensionales a resolución atómica. Indudablemente



*El ADN (ácido desoxirribonucleico) es el material genético de la mayoría de los seres vivos y almacena la información sobre el desarrollo, metabolismo y función de los organismos. El ADN consta de dos cadenas antiparalelas compuestas de sólo cuatro unidades o letras. (CRÉDITO: E. RUDIÑO)*



*Modelo de la estructura del ADN. (CRÉDITO: E. RUDIÑO)*



*Biofísica del vuelo de las aves.*

este método permitió tener las primeras ideas acerca de que el ADN es una doble hélice. En años recientes, muchos biofísicos se han interesado en investigar las bases físicas de la función biológica de moléculas específicas, organelos celulares hasta órganos basados en la mejora y refinación de los métodos ya existentes para ser capaces de describir estos sistemas con mayor detalle y precisión. Ejemplo de éstos son el método de la transferencia de energía por resonancia de fluorescencia y el de las pinzas ópticas donde el uso de láseres es indispensable.

Los biofísicos diseñan y realizan experimentos con láseres, ciclotrones, telescopios, espectrómetros de masas, pinzas ópticas, aparatos de resonancia magnética nuclear, microscopios electrónicos, y muchos otros equipos. También usan extensivamente las computadoras para la colección de datos y su análisis. Sus descubrimientos han tenido impacto en la biotecnología y en la medicina. El conocimiento de cómo funcionan las membranas y las proteínas es la base para el diseño de nuevos fármacos. El conocimiento de cómo funcionan los ligamentos, los músculos y los huesos están siendo aplicados para el diseño de mejores medidas de seguridad en los automóviles. El conocimiento de cómo funcionan los

flagelos presentes en muchos microorganismos, así como el auto ensamblado de algunas biomoléculas es la base para el desarrollo de nano-máquinas. El conocimiento de cómo se pliegan las proteínas puede ayudar al diseño de sistemas de biorremediación ecológica, como es la contaminación de ríos, lagunas y tierras de cultivo por desechos industriales. El conocimiento de las enfermedades genéticas o moleculares escondidas en el Genoma Humano puede ayudar a tener una medicina personalizada. El conocimiento de cómo se controla la información genética dentro de las células madre puede ayudar a la generación de órganos y tejidos dentro de los laboratorios para su implante en recipientes humanos. El conocimiento de las bases moleculares de las enfermedades puede ayudar a controlar enfermedades como la anemia falciforme, el SIDA, los cánceres, el Alzheimer y muchas otras. El conocimiento de cómo las plantas y algunos microorganismos transforman la energía solar a energía química puede ayudar a la obtención de energía limpia para el consumo de todas nuestras actividades. El conocimiento de estructura de la tela de araña y de las moléculas que la componen está ayudando al diseño de nanomateriales más resistentes que pueden ser usados en cirugía y hasta en

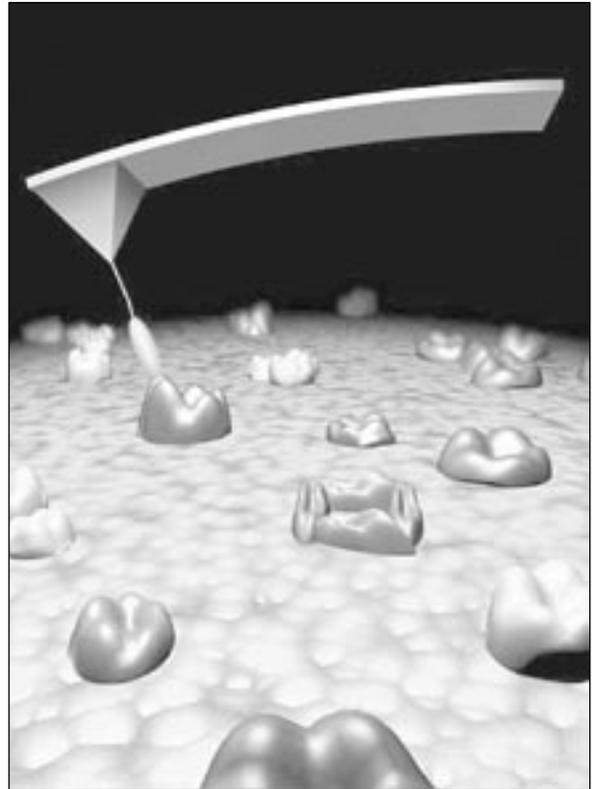
los chalecos antibalas. El conocimiento de la mecánica de asociación molecular en la formación de coágulos puede ayudar a evitar la trombosis y hasta cómo sellar una herida en hemofílicos.

Los biofísicos generalmente trabajan en grupos o equipos de otros científicos y profesionales con otro tipo de entrenamiento para colaborar en la resolución de problemas comunes. Por ejemplo, algunos estudian el comportamiento de moléculas pequeñas, mientras que otros estudian a las proteínas; luego cada científico trae sus hallazgos para encontrar soluciones a problemas médicos, de salud, de alimentación, de generación de energía, etc. En la investigación del ADN, los biofísicos están estudiando cómo las funciones de esta molécula y de las proteínas pueden ayudar a campos tan alejados de la biofísica como la criminología.

Los investigadores en Biofísica escriben artículos científicos y presentan sus trabajos en conferencias internacionales. Una parte integral de ser un científico exitoso es el mantenerse al día en las tendencias tecnológicas y científicas de su campo. Los biofísicos también trabajan como profesores de licenciatura y de posgrado en las universidades, además supervisan y guían el trabajo de personal técnico y de estudiantes de maestría y doctorado.

Un biofísico debe ser capaz de pensar de manera creativa y científica en cuanto a las ideas experimentales. Un conocimiento de la física y de la biología no solo nos lleva a una comprensión más profunda del mundo físico, sino que también proporciona al resto de la comunidad científica con una visión para el desarrollo de ideas innovativas en Biofísica.

La mayoría de los investigadores que se dedican a la Biofísica, durante la preparatoria descubrieron su curiosidad acerca de los fenómenos naturales, los acertijos, la solución de problemas y el diseño de cosas. Si usted tiene la oportunidad, le gustará participar en las múltiples ferias científicas que se realizan en Morelos, en las Olimpiadas Estatales en Ciencias, le gustará armar un equipo electrónico, experimentar con programas de cómputo o hasta el hacer sus propias fotografías. Para tener mayores



posibilidades de obtener una beca para estudiar biofísica usted debe tomar cursos de inglés, biología, física, química, matemáticas y cómputo. Seguramente ganará mucha experiencia si participa en el programa del Verano de la Ciencia que se organiza en Morelos. Si usted ya está en la universidad, podrá optar por las becas del Verano de la Investigación Científica que otorga la Academia Mexicana de Ciencias a los alumnos más avanzados, para que usted pueda estar en contacto con investigadores de algunos de los cerca de 30 centros e institutos de investigación instalados en el Estado de Morelos. Otra alternativa es que se ponga en contacto con cualquier miembro de la Academia de Ciencias de Morelos (ver “Libro de Miembros de la ACMor” en: [www.acmor.org.mx](http://www.acmor.org.mx)) que esté involucrado con la práctica de la Biofísica.



# Vestigios prehispánicos de la nanotecnología en México

**Jorge A. Ascencio**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos.  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A.C.

Hoy en día, se relaciona a la nanotecnología con perspectivas de aplicación en múltiples campos y comúnmente se llega a considerar que tales aplicaciones son lejanas a países como el nuestro. Sin embargo, es ilustrativo voltear la mirada al pasado, identificando los logros de nuestros antepasados al aplicar materiales nanoestructurados a aspectos sustantivos de su cultura. Recordemos que la nanotecnología refiere a la capacidad de emplear materiales y sistemas atómicos de dimensiones de una millonésima del milímetro ( $10^{-9}$  m ó 0.000000001 m) que, por su tamaño y propiedades adoptadas al contar con muy pocos átomos, presentan características muy interesantes que serán meritorias de posteriores escritos.

Al hablar sobre los antecedentes de la nanotecnología, la mayoría de la gente suele definir su inicio a partir de la plática que dictó el Dr. Richard Feynman (Premio Nobel de Física, 1965) en 1959, donde establece ideas aparentemente futuristas

relativas a la capacidad de acceder a la escala nanométrica. Así, Feynman sugiere la posibilidad de desarrollar un mecanismo para grabar la información completa de la Enciclopedia Británica en la cabeza de un alfiler, lo cual sin duda alguna repercute en la iniciativa de muchos investigadores al preguntarse: ¿Cómo y qué tan factible es llevar a cabo esto? Hoy en día pareciera que este evento tan significativo abrió las perspectivas al desarrollo de la ciencia y la tecnología de los materiales nanoestructurados. Sin embargo, es necesario entender que mucho antes del desarrollo de la tecnología moderna, en múltiples regiones se realizaron grandes avances en la aplicación de materiales nanoestructurados. Cabe mencionar que en nuestro país, México, se tiene un antecedente importante en cuanto al uso de estos materiales, como lo demostró el Dr. Miguel José Yacamán y su grupo, en un artículo publicado en *Science*, una de las revistas científicas de mayor reconocimiento. En dicho artículo, se estableció que las nanopartículas



Figura 1. Portada de la revista *SCIENCE* en referencia al pigmento "Azul Maya" donde se identificaron nanopartículas metálicas (izquierda) y otro ejemplo de los coloridos murales de Cacaxtla en la representación de un Guerrero Jaguar (derecha).

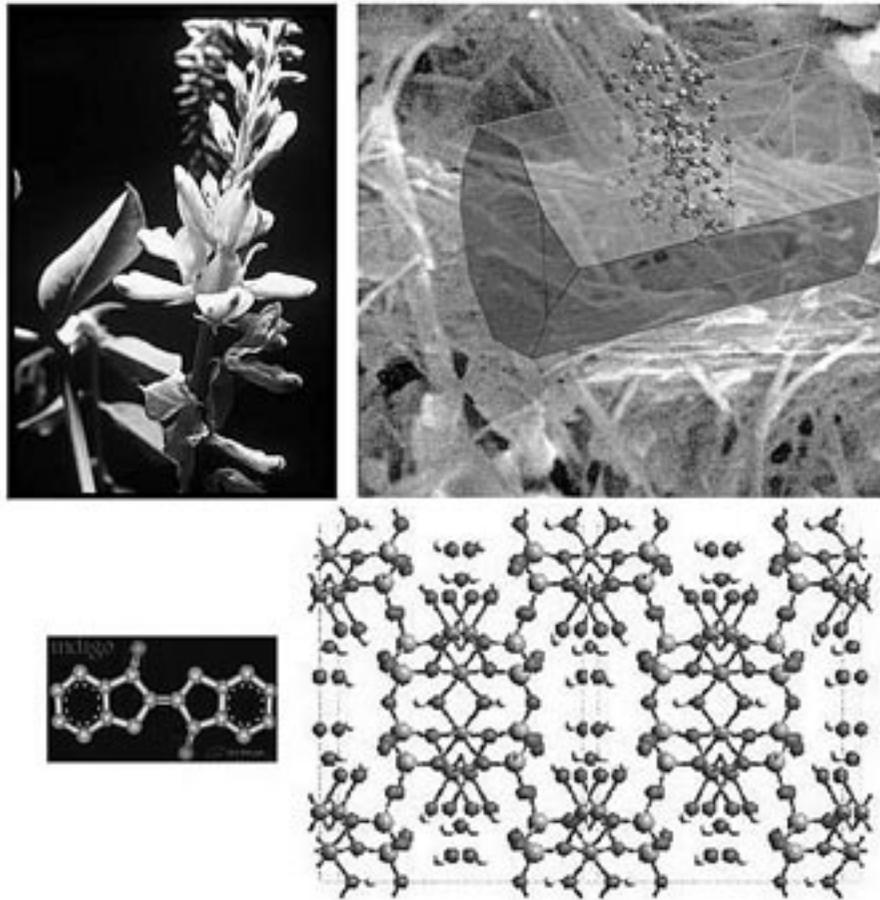


Figura 2. Planta de *Indigofera*, arcilla de palygorskita y los modelos de la molécula de índigo y de la palygorskita para entender la sección de canales para la inclusión del índigo en la formación del “azul maya”.

metálicas permiten fijar un pigmento a una arcilla para poder generar un color tan impresionante como lo es el “Azul Maya”.

Quien ha tenido la oportunidad de observar las pinturas prehispánicas en la zona de Centroamérica, en especial en la zona de influencia maya, recordará que se identifican múltiples colores en tonos azules, como se aprecia en la Figura 1, los cuales persisten a pesar del tiempo y las condiciones de intemperie. Los diferentes colores no son solamente hermosos sino característicos de la cultura maya y muy variados. Aquí, podemos identificar materiales arcillosos, es decir, materiales con estructura porosa que absorben continuamente agua y que también la liberan fácilmente. Estos materiales tienen canales entre sí, como se ve en uno de los recuadros de la Figura 2, donde se insertan las moléculas orgánicas que dan color a un objeto.

En particular, se ha identificado que la molécula orgánica que da color al azul maya es el índigo, derivado de la indigofera (*Indigofera schimperi*), que es una planta bastante común en la zona centroamericana. Después de un machacado, se extrae

esta molécula y se puede impregnar en algún material. El ejemplo más común de este procedimiento son los pantalones de mezclilla o jeans, los cuales tienen un color azul derivado de esta misma molécula. La pregunta sería entonces ¿por qué si los pantalones de mezclilla después de 3 ó 4 lavadas pierden en gran medida su color, otro material que utiliza el mismo pigmento puede durar hasta 500 años manteniendo sustancialmente su color original? Es decir, ambos están hechos del mismo pigmento molecular pero en el caso del azul maya, éste ha permanecido con gran intensidad a pesar de las condiciones de intemperie e incluso bajo el contacto con otros materiales, ya que gran parte de estas pinturas habían estado recubiertas con otras arcillas y materiales. La respuesta a esta interrogante es que existen partículas metálicas que sirven de “anclas”. Estas nanopartículas metálicas permiten fijar al índigo en los canales de las arcillas, lo que provoca que aunque el agua entre y salga del material, las moléculas queden ancladas por medio de interacciones físicas y químicas con la matriz de arcilla. De hecho, las nanopartículas metálicas actúan como una trampa que atrapa a las moléculas e impide

su desplazamiento.

Esta propiedad de las nanopartículas metálicas ha sido demostrada científicamente. Es claro que los mayas no sabían de la existencia de éstas nanopartículas, sin embargo las usaban de forma significativa, por lo que, de alguna manera, aplicaban la nanotecnología a pesar de no conocer la nanociencia. Una cuestión sumamente interesante, es que ellos hacían un proceso de biorreducción, que se ilustra a continuación. Los habitantes actuales de la zona platican que el mecanismo para sintetizar este pigmento era que los guerreros ganadores del juego de pelota, bebían cantidades importantes de pulque, el cual es rico en hierro, por lo que al día siguiente debido a la resaca, el pH de la orina era bastante ácido. La orina se depositaba entonces en vasijas donde las mujeres estaban moliendo la arcilla con el índigo; así, se inducía un crecimiento y una dilatación de poros bastante amplia, donde se depositaban las nanopartículas metálicas acarreadas en la orina. De esta forma, las nanopartículas en conjunto con el índigo y la arcilla producían el azul maya. Los estudios relacionados en este campo son múltiples y las perspectivas de replicar pigmentos equivalentes abren opciones de aplicaciones cada vez más cercanas.

Hoy en día, se ha encontrado la explicación

científica que subyace en el exitoso método artesanal empleado por los mayas. Este caso es interesante para establecer uno de los antecedentes más lejanos que se pueden reconocer de aplicaciones de lo que ahora denominamos nanotecnología. Existen algunos otros, como por ejemplo, el recubrimiento de cerámicas en la cultura moche o en culturas chinas y asiáticas, donde el recubrimiento de nanopartículas metálicas permitía la mejora de las propiedades tanto mecánicas como visuales. Es evidente que nuestros ancestros de la zona centroamericana tenían grandes capacidades, y hoy en día tenemos la responsabilidad de mantenerlas y ampliarlas. En esta perspectiva, la nanotecnología brinda la oportunidad de ir mucho más allá de la plática de Feynman, adentrándonos en el conocimiento de nuestros propios ancestros. Áreas como la física, la química, la arqueología, la ingeniería y la historia han encontrado un campo fértil para tratar de entender el desarrollo de materiales utilizados por nuestros antepasados.

Claramente, la nanotecnología es un esfuerzo multidisciplinario de gran alcance y riqueza. El campo novedoso de la nanobiotecnología, que permite atacar problemas tan complejos como los de la medicina y el medioambiente, es otro de los ejemplos fascinantes. Ya platicaremos de ellos próximamente.

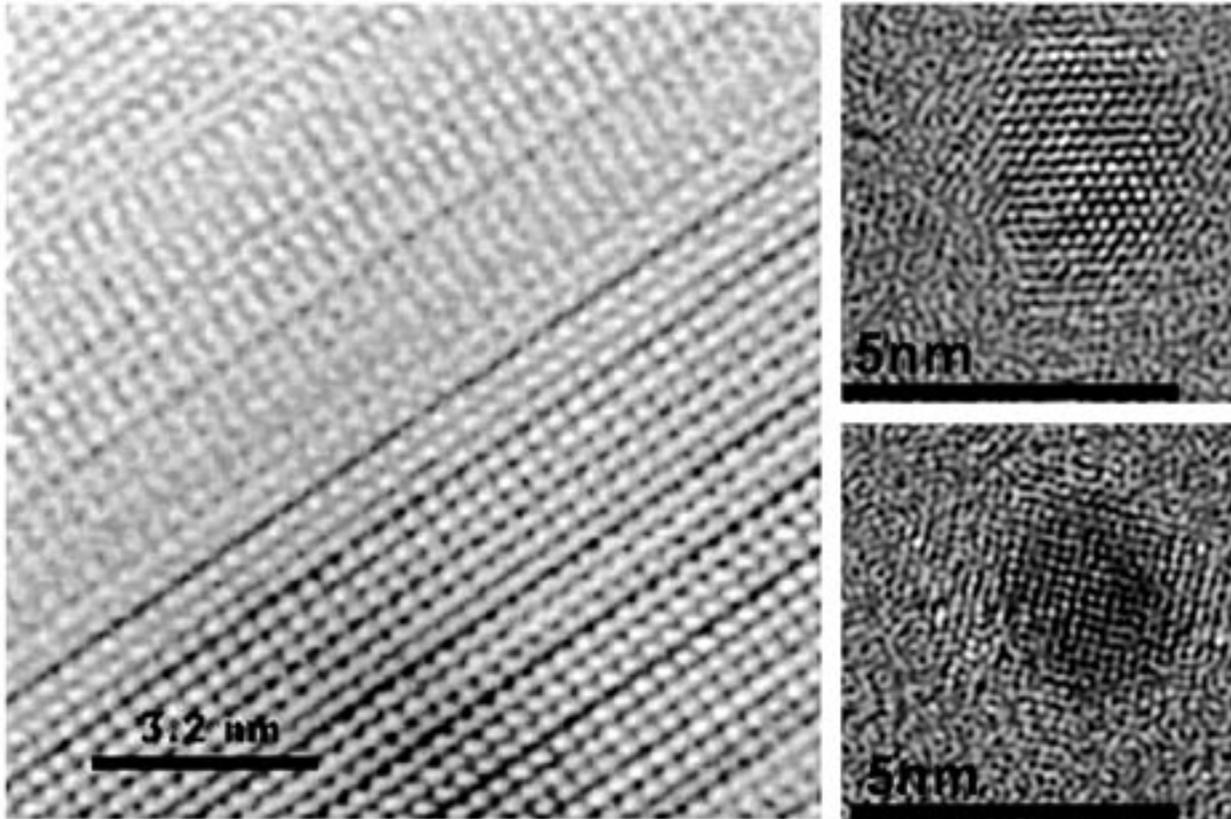


Figura 3. Imágenes de ultra alta resolución mediante microscopios electrónicos de las columnas atómicas que conforman la paligorskita (izquierda) y nanopartículas metálicas como las inmersas en el azul maya (derecha).



# Cuatro segundos que pueden salvar una vida: las leyes físicas básicas detrás del manejar seguro

**Ramón Garduño Juárez**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM-Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos

¿Cuántos de nosotros sabemos cuál es la distancia mínima requerida entre dos autos que viajan en la misma dirección sobre la misma carretera? ¿Cuántos de nosotros sabemos que la física puede salvarnos la vida? Me imagino que muy pocos...

Para el ciudadano común el poseer y manejar un automóvil hoy en día ya no es una señal de “status quo”, más bien se ha convertido en una necesidad. Sin embargo, ¿cuántos de nosotros vemos a nuestro automóvil como un proyectil más que una máquina para transportarnos, o quizá hasta una extensión de nosotros mismos? Este concepto depende de nuestro poco o mucho conocimiento de las fuerzas que actúan sobre el movimiento de nuestro vehículo. A menudo les digo a mis hijos que las fuerzas no se ven pero se sienten. Todos nos hemos topado con una puerta entreabierta, o nos hemos dado un golpe con un martillo sobre algún dedo. El dolor que nos causa es el efecto de haber sufrido un contacto cercano con

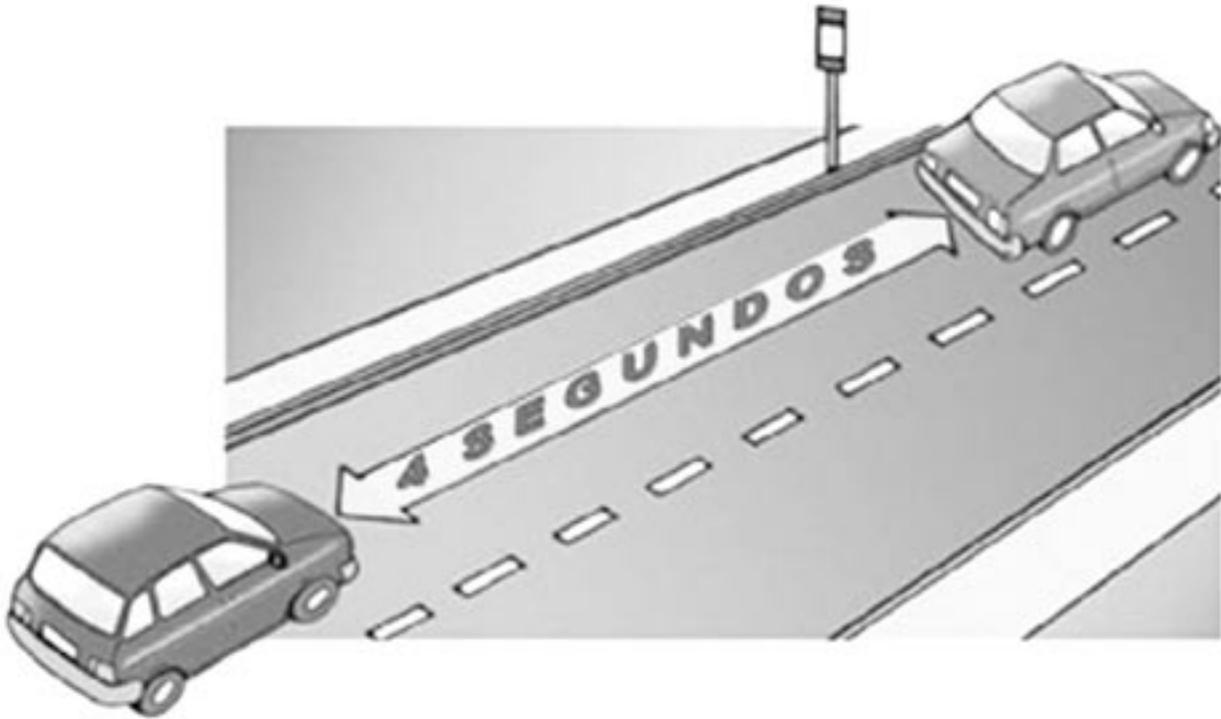
las fuerzas. Pues bien, si esto nos ocurre con fuerzas relativamente pequeñas, imagínense lo que puede ocurrir cuando nos enfrentamos a fuerzas mucho mayores; como aquellas que nos puede proporcionar un automóvil en movimiento.

Imaginen que van manejando en una carretera hacia unas merecidas vacaciones. ¿Se han preguntado alguna vez cuál es la distancia mínima entre su automóvil y el de enfrente, de tal forma que puedan frenar de manera segura si al otro vehículo se le poncha una llanta, o tiene que frenar de improviso para no arrollar a un animal que está cruzando la carretera? ¿Qué pasaría si esto sucede y ustedes están demasiado cerca?

Este supuesto problema puede evitarse de forma muy simple, y todo gracias a las leyes de la física. Sólo basta seguir una regla de oro muy simple que se deriva de las leyes del movimiento.

Para aquellos lectores que quieran aprender las leyes básicas detrás del manejar seguro, lo que se





muestra en los siguientes párrafos es lo que necesitan saber. Para aquellos lectores que sólo quieran saber la regla de oro, tendrán que esperar un poco ya que la daré casi al final de este escrito.

Sea  $T$  el tiempo que se requiere para frenar en una carretera ya sea en buenas o en malas condiciones (con niebla, lluvia o hielo).

Primero usemos las leyes de la cinemática:  $V = U + AT$ ; donde  $U$  es la velocidad del automóvil cuando empieza a frenar y  $V = 0$  es la velocidad final (esto es, en reposo o alto total). De tal forma que  $T = -U/A$ , y necesitamos encontrar  $A$ , la desaceleración de frenado (una cantidad negativa) que depende de las condiciones de la carretera.

Ahora usemos las leyes de la dinámica: la fuerza de fricción entre el automóvil y el piso es  $F = KN$ ; donde  $K$  es el coeficiente de fricción y  $N = Mg \cos(\Omega)$  donde  $N$  es el peso de un automóvil de masa  $M$  en una carretera con un ángulo de inclinación ( $\Omega$ ) y siendo  $g$  la aceleración de la gravedad. Además, de la segunda ley de Newton sabemos que la fuerza neta del carro en la dirección en que va viajando es  $F=MA$ .

La fuerza de fricción es la única fuerza que se da en la dirección en que se mueve el auto. Así,  $F = MA = KMg \cos(\Omega)$ , de donde  $A = K g \cos(\Omega)$ . Este es el límite superior de desaceleración para que un automóvil pueda detenerse para una  $K$  y una inclinación dadas. Hay que recordar que  $g = 9.81 \text{ m/seg}^2$  en unidades internacionales.

Ahora coloque este resultado en la ecuación de la cinemática y verá que  $T = U/(K g \cos(\Omega))$ . Así,

se puede encontrar  $T$  para una carretera en buenas condiciones (con  $\Omega = 0$  grados y  $K = 0.8$ , por ejemplo) y para una en malas condiciones (con  $\Omega = 30$  grados y  $K = 0.1$ ). Aquí,  $K = 0.8$  corresponde a una carretera seca (mayor fricción) y  $K = 0.1$  es para una carretera húmeda y resbalosa ya sea por hielo o por diesel (menor fricción). El lector interesado puede hacer una gráfica de  $T$  contra  $K$  para conocer cómo el tiempo de frenado aumenta linealmente al empeorar las condiciones de la carretera. Algunas ecuaciones más elaboradas se pueden ver en: <http://www.andrewbetts.com/speed/> y en <http://www.csghnetwork.com/stopdistcalc.html>.

Si se aprende esta lección, se verá que más tiempo de frenado significa más espacio entre su carro y el de enfrente para evitar una colisión trasera. En pocas palabras, hay que poner mayor distancia entre ambos automóviles en mal clima, y hay que respetar los límites de velocidad establecidos. Es claro que no se pone este tipo de señalamientos en las carreteras simplemente para adornarlas.

Los que han investigado y analizado la causa de los choques carreteros, por medio de numerosos estudios, se han dado cuenta que hay un intervalo de tiempo de reacción del conductor antes de que éste pise el pedal del freno. Este intervalo es de 1.5 segundos y no de 0.65 segundos como se pensaba no hace mucho. Este lapso de tiempo de reacción de 1.5 segundos es para conductores que están alertas y despiertos, no para aquellos que viajan largas horas sin descanso o que van bajo la influencia del alcohol o de algún

psicotrópico. La menor distracción puede aumentar el tiempo de respuesta y aumentar el riesgo de un accidente por colisión.

Por ejemplo, si aplicamos este tiempo de respuesta de 1.5 segundos a un vehículo que viaja a 20 km/h, notaremos que durante este lapso el vehículo habrá viajado 8.3 metros. Si éste viaja a 55 km/h, durante el tiempo de reacción del conductor, el carro se habrá desplazado un poco más de 22 metros. Y así sucesivamente.

A este tiempo de reacción, o de respuesta, se le tiene que adicionar el tiempo de frenado. Esto da como resultado una mayor distancia en el frenado real. En la figura (pág. 85) se muestra una gráfica del tiempo de reacción más el tiempo de frenado para diferentes velocidades.

Así, si una persona se encontrara a 45 metros de distancia de varios vehículos en movimiento, sólo aquellos que viajan a una velocidad menor a 60 km/h no lo arrollarán. Los demás, lo matarán, o en el mejor de los casos lo enviarían al hospital con lesiones muy graves. Esta persona podría ser algún familiar nuestro. Por este motivo en las zonas escolares y dentro de las instalaciones universitarias donde hay tránsito vehicular, la velocidad MÁXIMA recomendada es de 20 km/h que todos los conductores estamos obligados a respetar.

Para mantener una distancia segura entre dos vehículos hay que seguir una regla de oro que funciona a cualquier velocidad. Esta regla obliga al que la usa a estar al menos cuatro segundos detrás del vehículo que está directamente enfrente del suyo. Así, si usted viaja por la ciudad o por carretera, la regla de oro indica que observe al vehículo que está adelante y tan pronto éste pase por un objeto fijo (no uno que también se está

moviendo) se debe comenzar a contar “diez mil uno, diez mil dos, diez mil tres, diez mil cuatro”. Buenos ejemplos de objetos fijos son los postes de luz, un árbol, un señalamiento, un puente, las marcas de paso peatonal, etc., aunque se pueden emplear muchos otros puntos de referencia fijos. De esta manera, si descontamos los 1.5 segundos del tiempo de reacción, usted tendrá al menos 2.5 segundos para frenar. La figura (pág. 85) ilustra esta acción.

Y por supuesto, si algún conductor impaciente le rebasa – siempre habrá alguien así – comience a contar de nuevo y reduzca la velocidad de su auto para volver a mantener la distancia segura entre los dos vehículos. Esto seguramente será una prueba para su paciencia, pero siempre es mejor probar la resistencia de su paciencia que probar la resistencia de su cráneo al tener la posibilidad de colisionar a otro auto adelante del suyo sólo por seguirlo muy de cerca. La única excusa para golpear a otro vehículo por detrás es si usted fue impactado por detrás por otro automóvil, que a su vez le obligó a impactar al vehículo de enfrente.

¿Qué hacer si alguien le sigue muy de cerca? Simplemente reduzca su velocidad muy gradualmente y pise el pedal del freno muy ligeramente varias veces por tiempos cortos, de tal manera que el otro conductor tenga más tiempo para reaccionar al ver sus luces de frenado, y por favor, facilite que éste le rebase. Siempre es preferible manejar a la defensiva, aunque para muchos conductores usted parezca un tonto. Recuerde, las carreteras no son pistas de competencia de NASCAR. Usted tiene el poder de hacer que las carreteras sean más seguras. Y como reza el dicho popular “más vale un minuto tarde, que un minuto de silencio”.



# El sabor en la cocina solar

**J. Antonio del Río**

Centro de Investigación en Energía, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

¿A qué sabe la comida solar? Esta es una de las preguntas que me hacen cada vez que alguna persona se entera que en el Centro de Investigación en Energía (CIE) de la UNAM tenemos desarrollos de hornos y cocedores solares, en particular, cuando se sabe que tenemos patentes de estos dispositivos. Las estufas, hornos y cocedores solares son artefactos que permiten cocinar alimentos utilizando la radiación solar como fuente de energía. Existe una gran cantidad de diseños de estufas y hornos solares en el mundo (ver [www.solarcooking.org](http://www.solarcooking.org)).

El nombre de cocedor solar enfatiza las diferencias con los hornos y estufas solares. Éstas radican

principalmente en dos aspectos: un mecanismo de orientación sencillo hacia el Sol, que puede ser operado por cualquier persona, y un sistema automático de control de la temperatura interna del cocedor que provee energía térmica de respaldo en caso necesario.

Durante más de dos años se cocinaron diferentes guisos en el CIE comprobándose que el modelo termodinámico que sustenta su diseño concordaba con las mediciones de la temperatura interna del cocedor solar. Durante todo este tiempo la respuesta de los invitados a comer era: la comida solar sabe bien. Sin embargo, nunca se realizaron estudios con guisos testigos; es decir, no se guisó lo mismo usando estufas





de gas o eléctricas y el cocedor solar para comparar los resultados; ni mucho menos se realizaron estudios de opinión sobre las características de sabor, olor, color, textura; en lenguaje técnico: las características organolépticas de los alimentos preparados en un cocedor solar.

Recientemente, el trabajo de investigación sobre las características organolépticas de la comida solar fue abordado por un equipo de profesores de bachillerato e investigadores en ingeniería. Para tratar esta problemática, se contó con un equipo multidisciplinario integrado por profesores del Colegio Nacional de Educación Profesional Técnica en Temixco (CONALEP) y del Colegio de Bachilleres e investigadores y estudiantes del CIE. Los primeros son personal docente de la carrera técnica de gastronomía y los segundos son estudiosos de la termodinámica de aplicaciones solares. Este estudio fue realizado durante el diplomado “Pensamiento Científico en el Aula” impartido por la Academia de Ciencias de Morelos a profesores de educación media. Una versión detallada de este trabajo apareció en el número de julio de 2009 de la publicación “Correo del Maestro”.

Para hacer este estudio se prepararon diferentes

platos con el cuidado e higiene requeridos, tanto en una estufa de gas como en el cocedor solar: galletas, frijoles charros, merengues, caldo tlalpeño, caldo blanco de res, caldo de mojarra, cerdo en adobo, entomatado de pollo y pan de requesón. Se utilizaron ingredientes idénticos y se procedió a realizar la evaluación sensorial. La elaboración era ligeramente diferente: en la estufa de gas se realizó siguiendo el procedimiento de las recetas, respetando los momentos de cada platillo; en el cocedor solar se vertieron todos los ingredientes en la olla, debido a que no se podían manipular durante el tiempo de cocción ya que la temperatura del cocedor baja al abrirlo. El cocedor requiere de alineación y orientación para recibir los rayos del Sol, aspecto que se verificaba a las 9:30 hrs. Se sabe que el proceso de cocción de los alimentos inicia entre los 50 y los 60°C; mientras mayor sea la temperatura, más rápida será la cocción. La temperatura ideal es de 80 a 100°C, temperaturas mayores destruyen vitaminas y proteínas en los alimentos. El platillo colocado en el cocedor solar con respaldo se introducía a las 10:00 hrs, después de las 12:00 hrs se podía activar automáticamente el respaldo eléctrico, esto para que alcanzara la temperatura ideal



de cocción en los momentos en que la energía solar no fuera suficiente para llegar a dicha temperatura. Con esto se aseguraba que la comida solar estuviera lista a las 14:00 hrs. A los guisos se les asignaba una letra (A o B) para diferenciar las que eran cocidas con gas o con energía solar. Es importante mencionar que no siempre se le asignaba la misma letra al mismo tipo de guiso (solar o de gas).

La evaluación sensorial se ocupa de la medición y cuantificación de las características de un producto. Este tipo de análisis tiene la ventaja de que los jueces que efectúan las mediciones llevan consigo sus propios instrumentos de análisis: sus cinco sentidos. A la evaluación se invitaron a docentes del área de gastronomía, personal administrativo, intendencia, alumnos y docentes de otras áreas; es decir, había jueces expertos y consumidores. La aplicación de esta metodología en la industria alimentaria es muy común dada su sencillez, facilidad y rapidez.

En la medición sensorial se utilizó la escala (llamada "hedónica") asignándole una numeración a cada respuesta cualitativa: Excelente, Bueno, Regular, Malo y Pésimo. Se cuantificaron por pregunta, obteniéndose los promedios y comparando los

elaborados en el cocedor solar y en la estufa de gas. La calificación de todos los platillos, solares y normales, fue "Buena". Se obtuvo calificación mayor o igual a cuatro en escala de cinco, reportándose en general que las características eran similares. Como en una investigación científica no se puede decir "similar" sin cuantificar, se procedió a realizar una prueba estadística, la prueba de la  $\chi$  cuadrada, para analizar si las diferencias entre los resultados obtenidos para los platillos eran estadísticamente confiables (ver [http://es.wikipedia.org/wiki/Prueba\\_de\\_ji-cuadrado](http://es.wikipedia.org/wiki/Prueba_de_ji-cuadrado)). El resultado fue que no se podía rechazar la hipótesis de que las características de los alimentos preparados en el cocedor solar fueran similares a los cocinados en la estufa de gas. Es decir el sabor, olor, color y textura de la comida solar es similar a la comida hecha en estufa de gas. En resumen, la comida solar sabe igual que la comida hecha en estufa de gas.

En opinión de los profesores de gastronomía, el cocinar en el cocedor solar nos proporciona grandes ventajas:

- El tiempo que se emplea para la preparación de los alimentos es menor.
- El o la cocinera no necesita cuidar los alimentos



durante el tiempo de cocción, ocupando este tiempo para realizar otras actividades.

- En el cocedor solar los alimentos presentan una menor pérdida de agua (no se corre el riesgo que se quemen).

- Las grasas de los alimentos cocinados en el cocedor solar tienden a flotar por lo que se facilita el desgrasado de éstos.

En opinión de los ingenieros, la cocina solar muestra también que el uso de la energía solar en la actualidad es una alternativa para disminuir el consumo y quema de los combustibles fósiles, reduciendo así la contaminación de nuestra atmósfera y propiciando un uso racional de la energía.

Por otro lado, de acuerdo con la información consultada, los alimentos cocinados a temperaturas bajas conservan mejor sus nutrientes, lo que

naturalmente lleva a otro tema de investigación: ¿Qué tan bien se conservan los nutrientes de los alimentos cocinados en la estufa de gas y el cocedor solar?

El equipo que realizó la investigación estuvo integrado por: José Luis Ayala Hernández, Silvia Demesa Udave, Úrsula Brenda Rayo Cisneros, María Aitzane Delgado Yoshino, Saúl Tapia Salinas y Jesús Antonio del Río Portilla. Este es un ejemplo claro de cómo la interacción de los centros de investigación en Morelos, en colaboración con otras instituciones educativas, pueden llevar a cabo tareas importantes para la sociedad. Este trabajo requirió el apoyo de los directivos de los planteles educativos involucrados que entendieron la importancia de las actividades multidisciplinarias y dieron las facilidades necesarias para la realización de este estudio.

# De fluidos y tiendas...

**Hernán Larralde**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos. A. C.

Un dicho común entre empresarios, sostiene que los tres puntos fundamentales para asegurar el éxito de un negocio son, en orden de importancia, su ubicación, su ubicación y su ubicación. De hecho, dada la importancia que tiene la ubicación, hay compañías que pueden ser contratadas para tratar de determinar la que consideran que es la ubicación ideal para echar a andar un negocio específico. Para hacer esta determinación hacen estudios de mercado, levantan encuestas y estudian qué sectores de la población visitan cada sitio potencial para ubicar el negocio. Sin embargo, aun después de todos estos estudios y a pesar de tener amplia experiencia, no es fácil decidir cuál será una buena ubicación para un negocio, y un error en esta decisión puede significar la quiebra.

Mi interés en este problema surgió de observar que los negocios de ciertos giros tienden a agruparse, incluso, a veces se ubican literalmente uno junto otro en una misma calle. Sin embargo, hay negocios de otros giros que tienden a distribuirse más uniformemente en la ciudad. Por ejemplo, las joyerías típicamente se agregan unas con otras. Si bien es cierto que a veces uno encuentra una joyería aislada, la mayoría de las veces se verá que donde hay una joyería medianamente exitosa, hay en las cercanías varias joyerías más, a las que generalmente también les va bastante bien. Lo mismo pasa con los distribuidores de autos, las tiendas de pisos, las galerías de arte, las tiendas de vestidos de novia, la fayuca, las tiendas de muebles, etc. Pero, insisto, hay giros para los cuales ocurre exactamente lo opuesto: por ejemplo las panaderías, las carnicerías, las tiendas de abarrotes, las peluquerías, las tortillerías, etc. De nuevo, siempre hay excepciones, pero en general uno no encuentra dos o tres panaderías, digamos, en la misma cuadra. ¿Porqué pasa esto? Si uno lo piensa ingenuamente, resulta sorprendente que haya giros que no les perjudique agregarse, ya que parecería que la cercanía con otro negocio del mismo giro los obliga a competir en precios y, por lo tanto, a tener menores ganancias. Pero, de hecho, a los giros que tienden a agregarse, no sólo no les perjudica estar cerca de sus competidores, incluso les es benéfico. Al mismo tiempo, para giros como las panaderías, la cercanía con sus competidores efectivamente les perjudica.

Curiosamente, en la física uno puede hallar un fenómeno vagamente parecido: los fluidos están formados por moléculas que interactúan unas con otras, éstas vendrían a jugar el papel de las tiendas. Ahora bien, dependiendo de las condiciones de

densidad y temperatura, un fluido puede pasar de una fase gaseosa, donde las moléculas están separadas y ocupan uniformemente el recipiente que las contiene, a una fase condensada, donde las moléculas tienden a agregarse, más o menos como pasa con las tiendas. De hecho, el entendimiento de las transiciones de fase es uno de los grandes éxitos de la física estadística, que es la rama de la física que estudia el comportamiento de sistemas macroscópicos a partir de modelos microscópicos, utilizando métodos estadísticos. Se sabe que las transiciones pueden ocurrir de manera continua, pasando por un punto crítico que es un estado muy peculiar del sistema, o de manera discontinua (como cuando el agua hierve). Se sabe también que, bajo ciertas condiciones, dos fases distintas del mismo material (gas y líquido) pueden coexistir en equilibrio. Se entienden los efectos de constreñir al sistema para que todas las moléculas estén sobre un plano o sobre una línea; se sabe cómo inducir la transición cuando ésta no ocurre espontáneamente (así es como hacen llover) y cómo retrasarla para que no suceda aún cuando las condiciones están dadas.

De manera que, si se pudieran entender las distintas distribuciones de negocios como las fases de un fluido, se podrían también aplicar las herramientas que ya han sido desarrolladas en la física para decidir la ubicación óptima de un negocio, y, dada una ubicación, estimar la probabilidad de éxito de un negocio.

Pero más allá del hecho de que hay similitudes entre la transiciones de fase y la distribución de las ubicaciones de los negocios, ¿realmente será posible entender las diferencias entre las distribuciones de tiendas de distintos giros en términos de las transiciones de fase? De ser así, ¿cómo interactúan entre sí las tiendas?, y, ¿qué vendría a jugar el papel de la temperatura para el caso de las tiendas?

En términos generales, se puede suponer que los vendedores deciden la ubicación de su tienda y el precio al que ofrecen su producto; y, también de manera muy general, podemos suponer que toman esas decisiones buscando maximizar sus ingresos. Entonces, por ejemplo, si un vendedor decide reubicar su negocio para incrementar sus ingresos, este incremento frecuentemente se traduce en una disminución de los ingresos de otro negocio del mismo giro. Este otro comerciante puede responder reduciendo los precios de su producto, o reubicarse él también, con la esperanza de incrementar el número de sus clientes, quitándoselos a la competencia. Esta serie de acciones, cambios de ubicación y ajuste de



precios termina cuando se llega a una situación en que ninguno de los comerciantes pueda incrementar sus ganancias realizando una acción unilateralmente, es decir, cuando llegan a una situación de equilibrio.

Aquí cabe hacer notar que las ganancias que se obtienen en equilibrio no son las ganancias más altas que podrían obtener estos comerciantes, son las más altas que pueden obtener sin ponerse de acuerdo, es decir, sin cooperar el uno con el otro. Teóricamente, esta situación de equilibrio es conveniente para los consumidores ya que la alternativa sería que se pusieran de acuerdo los comerciantes, y, dado lo que quieren es maximizar sus ganancias, todos suban los precios uniformemente. Estos acuerdos entre comerciantes, que técnicamente se llaman cárteles, no son estables y los participantes del cártel tienen incentivos para hacer trampa. Por ejemplo, si uno de los comerciantes coludidos baja un poco sus precios a escondidas, puede robarse a la mayoría de los consumidores, incrementando sus ganancias a expensas del resto de los miembros del cártel.

Para completar esta descripción básica, falta saber cuál es el comportamiento de los consumidores. De hecho, como hemos supuesto que el comportamiento de los vendedores es siempre el mismo: tomar las acciones que maximicen sus ganancias, las diferencias entre las distribuciones de equilibrio entre negocios de distintos giros va a depender únicamente de los distintos comportamientos de los consumidores al comprar mercancías de un giro o de otro. Por ejemplo,

suponiendo que no hay gran diferencia entre pollos, un consumidor normalmente preferirá comprar el pollo que le cueste más barato, incluyendo el costo de transporte. Por tanto, si hubiera dos pollerías una junto a la otra, los consumidores comprarían exclusivamente en aquélla que ofreciera el precio más bajo. Si las pollerías entraran en una guerra de precios sus ganancias se desplomarían, por lo que les conviene más reubicarse, es decir, ¡separarse! En cambio, si alguien va a buscar un vestido de novia, no necesariamente compra el más barato, esto suaviza la competencia en los precios entre las distintas tiendas, permitiendo que varias se ubiquen en los sitios más céntricos de la ciudad, lo cual hace que esa agregación de tiendas de vestidos de novias sea más atractivo para los clientes que buscan variedad. Así pues, desde esta perspectiva, las tiendas interaccionan unas con otras, se atraen o se repelen como las moléculas de un fluido, dependiendo del comportamiento de sus consumidores.

El análisis hasta ahora parece ser satisfactorio, pero sólo se han podido hacer cálculos explícitos para el caso de dos tiendas. ¿Qué pasa cuando hay muchas tiendas? ¿Cuántas tiendas pueden estar juntas en un agregado? ¿En qué momento le dejará de convenir separarse a las tiendas de un giro? Parece que nadie sabe las respuestas, pero aunque los físicos aún estamos lejos de poder colaborar con las compañías especializadas en las decisiones relacionadas con la ubicación de negocios, estamos aprendiendo.

# Fenómenos naturales en la temporada de lluvias

**Manuela Calixto**

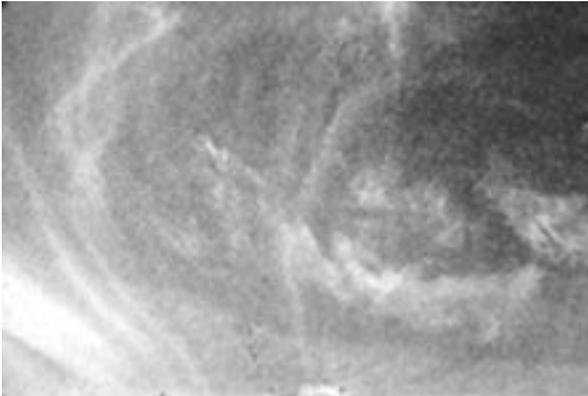
Estancia Posdoctoral, Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos

**Horacio Martínez**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

En la época de lluvias es común observar diferentes fenómenos naturales que sabemos que existen pero no sabemos por qué suceden, y su explicación puede ser muy simple de entender. Por ejemplo, en la temporada de lluvias se puede observar llover y a lo lejos en las montañas, o si viajamos a Tres Marías, se puede ver un poco de neblina. Para explicar estos fenómenos, primero tenemos que explicar qué es una nube. Una nube es un grupo de gotitas de agua (o cristales de hielo cuando las temperaturas son muy bajas) suspendido

en el aire. Y ¿cómo se forman las nubes? El aire que contiene vapor de agua, que inicialmente está a nivel del suelo, es calentado por la luz solar por lo que se vuelve menos denso y comienza a elevarse, y conforme asciende se va enfriando. Las nubes se forman cuando el aire húmedo se enfría por debajo de una temperatura crítica y entonces el vapor se condensa, convirtiéndose en gotitas líquidas lo suficientemente ligeras para flotar en el aire. Algo similar ocurre en un frente meteorológico, donde una masa de aire caliente choca contra una masa de



*Cirros\**.



*Alto cúmulos\**.



*Estratonimbos\**.



*Cumulonimbos\*\**.



*Cirrocúmulos.*



*Cúmulos.*

aire frío. El aire caliente es más liviano y siempre se mueve hacia arriba, por encima del aire frío. En un frente suele haber nubes, lluvia y tormentas. Por cierto, hay 10 tipos de nubes, se clasifican según la altura que tengan con respecto del suelo. Se dividen en cuatro grupos: las nubes de nivel alto como los cirros, los cirroestratos y los cirrocúmulos, son nubes que están hechas de millones de cristales de hielo, estas nubes nunca producen chubascos ni nieve; las nubes de nivel medio incluyen a los altoestratos y altocúmulos; las nubes de nivel bajo comprenden a los estratos, estratocúmulos y estratonimbos (los estratos a nivel del suelo son niebla); y por último las nubes desarrolladas verticalmente son los cúmulos y los cumulonimbos, las nubes cumulonimbos suelen producir lluvias intensas y tormentas eléctricas. Ahora veamos, ¿cómo se produce la lluvia? La lluvia y la nieve caen desde las nubes. Esto ocurre cuando las gotas de agua o los cristales de hielo de las nubes se vuelven demasiado grandes y pesados como para

quedarse en el aire. Lo que atrae hacia abajo al agua o al hielo es la gravedad de la Tierra. Llueve cuando el aire está caliente, y nieva cuando el aire está frío. A veces, de las nubes empieza a caer nieve que en el camino se calienta, se derrite y se convierte en lluvia. El granizo se forma cuando los cristales de hielo de una nube son sacudidos por fuertes corrientes de aire. Las gotas de agua de las nubes se congelan, se transforman en cristales de hielo y se agrandan hasta que caen en forma de granizo. Otro fenómeno interesante es la niebla. La niebla es una nube que se forma cerca de la superficie terrestre cuando una capa espesa de aire que está al ras del suelo se enfría. El vapor de agua del aire se condensa y se convierte en gotas de agua. Estas gotas diminutas quedan suspendidas en el aire en forma de niebla. ¿No es maravilloso entender los fenómenos naturales que se observan en la temporada de lluvias y que a veces no les ponemos la atención que se merecen? ¿No es maravillosa la Naturaleza?

Imágenes tomadas de:

\*[http://www.atmosphere.mpg.de/enid/121d100cc8e910f8525484944e5c13e6,0/1\\_\\_Nubes/\\_-Tipos\\_de\\_nubes\\_3iu.html](http://www.atmosphere.mpg.de/enid/121d100cc8e910f8525484944e5c13e6,0/1__Nubes/_-Tipos_de_nubes_3iu.html)

\*\*<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/CUMULONIMBO.jpg>

Este artículo fue publicado en La Unión de Morelos el 11 de mayo de 2009, p. 30-31 y se puede obtener en: [http://www.acmor.org.mx/descargas/09\\_may\\_11\\_fenomenos.pdf](http://www.acmor.org.mx/descargas/09_may_11_fenomenos.pdf)

# ¿Por qué las brújulas apuntan hacia el norte?

**Sergio Cuevas García**

Centro de Investigación en Energía, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

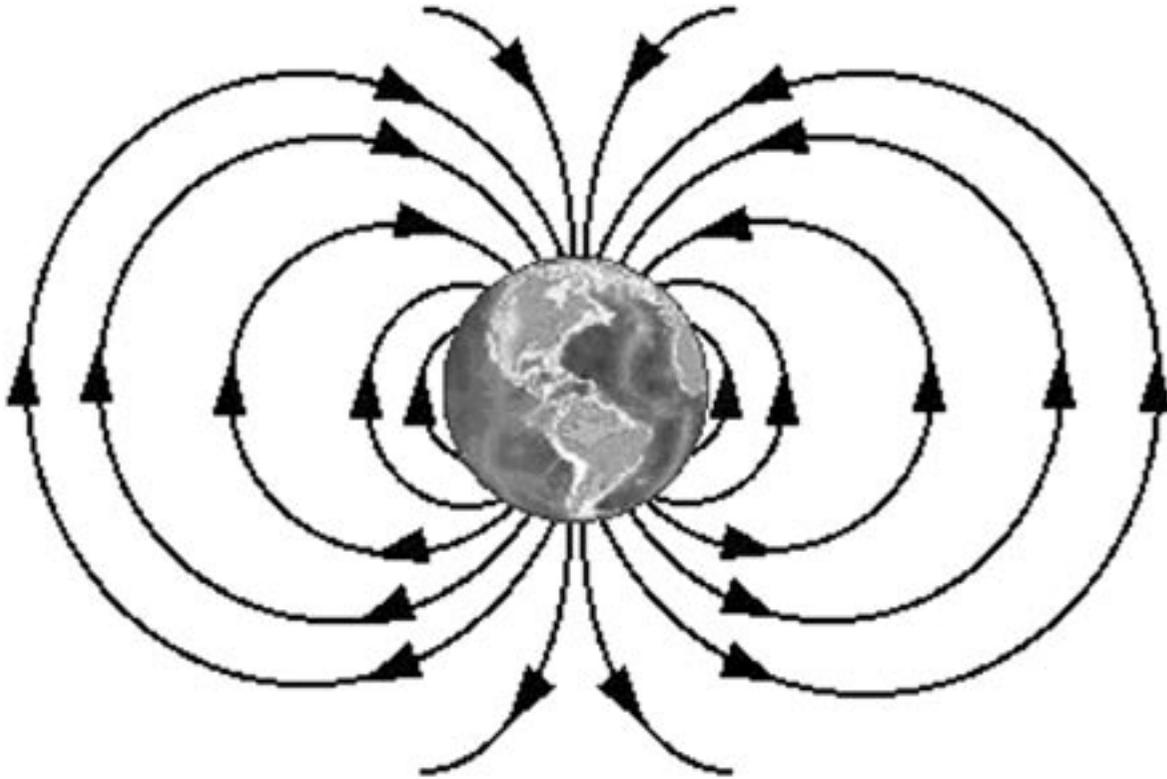
No pocas vocaciones científicas han surgido del asombro que produce el comportamiento de los imanes y, en particular, de aquellos aparatos milenarios conocidos como brújulas. El mismo Albert Einstein relata el milagro que presenció a los 4 o 5 años cuando su padre le mostró una brújula: la atracción ejercida sobre la aguja imantada sin que mediara contacto alguno parecía vislumbrar un secreto profundamente oculto. El secreto al que Einstein se refería, es decir, la razón por la cual las brújulas apuntan hacia el norte, ha sido una de las mayores interrogantes que ha ocupado a los científicos desde los inicios de la ciencia moderna. Sabemos que los imanes tienen dos polos inseparables. Si acercamos dos polos iguales, los imanes se rechazan mientras que si los polos son opuestos, se atraen. Por tanto, si la aguja imantada de la brújula se ve siempre atraída hacia el norte, inferimos que debe existir un polo magnético opuesto en el norte de nuestro planeta. Que la Tierra se comporta como un imán es un hecho conocido por la humanidad desde hace muchos de años. La pregunta realmente interesante es entonces: ¿cuál es la razón de que la Tierra se comporte como imán? La respuesta permaneció oculta durante mucho tiempo y es hasta muy recientemente cuando ha surgido lo que parece una explicación razonable y consistente.

Actualmente, entendemos un imán a través del concepto de campo, surgido a partir de los trabajos de Michael Faraday en el siglo XIX. A la presencia de un imán asociamos la existencia de un campo magnético en el espacio circundante, que en el caso de la Tierra denominamos campo geomagnético. Faraday también sugirió visualizar un campo magnético a través de líneas imaginarias, llamadas líneas de fuerza, que salen de uno de los polos del imán y terminan en el polo opuesto. Podemos distinguir básicamente entre dos tipos de imanes, los permanentes, que son materiales que manifiestan sus propiedades magnéticas siempre y cuando no se exceda una temperatura crítica, y los electroimanes, que son producidos por la circulación de corrientes eléctricas.

Desde hace miles de años se sabe de la existencia en forma natural de materiales magnéticos (imanes permanentes), como la magnetita, en el interior de la Tierra. Podría resultar razonable suponer que la Tierra se comporta como un imán debido a la existencia de grandes cantidades de materiales magnéticos inmersos en su interior. Sin embargo, tal explicación implicaría que el campo geomagnético no cambia con el tiempo. Nada más alejado de la realidad. Hoy

en día sabemos que dicho campo presenta distintos cambios temporales y una evidencia de ello es la inversión de los polos magnéticos. Del análisis de la magnetización de rocas originarias de sedimentos y lavas formados en periodos geológicos distintos, se ha determinado que la orientación del campo geomagnético ha cambiado varios cientos de veces a lo largo de los 4,500 millones de años de historia de la Tierra. Es decir, los polos magnéticos norte y sur han intercambiado muchas veces sus posiciones. Otra evidencia es que la localización misma de los polos magnéticos cambia continuamente y aún la intensidad del imán terrestre ha variado a lo largo del tiempo. Por otro lado, la magnetita, el material básico de los imanes naturales, pierde sus propiedades magnéticas aproximadamente a 580 °C, una temperatura menor que la temperatura de la Tierra a una profundidad de 30 km. Por estas razones, una explicación del origen del campo geomagnético basada en la existencia de imanes naturales en el interior de la Tierra resulta totalmente inadecuada. Si este campo no es producido por imanes permanentes, necesariamente debe ser generado por corrientes eléctricas, es decir, por un electroimán terrestre. La explicación de la existencia y el mantenimiento del campo geomagnético está ligada por un lado, a la estructura interna de la Tierra y, por otro, a una ley física fundamental, la ley de inducción de Faraday, que da cuenta de la posibilidad de transformar la energía de movimiento en energía eléctrica. Esta ley es la base de la dínamo o generador eléctrico inventado por W. von Siemens en 1867, gracias al cual fue posible generar electricidad a gran escala.

A partir de registros sismológicos, se ha determinado que en el centro de la Tierra existe una esfera sólida de una aleación de hierro y níquel denominada núcleo interno, que se encuentra a presiones y temperaturas muy elevadas. Envuelto al núcleo sólido interno se encuentra el núcleo fluido externo compuesto de metal fundido (principalmente hierro). Éste, a su vez, está limitado por el rocoso manto terrestre por encima del cual está la corteza donde vivimos. El núcleo fluido resulta clave para el entendimiento del campo magnético terrestre ya que es precisamente en este núcleo de metal líquido donde se origina dicho campo. El proceso que da lugar a la generación del campo geomagnético involucra movimientos bruscos y desordenados de hierro líquido ocasionados por la rotación de la Tierra y por las diferencias de temperatura y composición



*Líneas de fuerza que ilustran la existencia del campo magnético terrestre..*

química que existen en el núcleo fluido. La energía acumulada en este movimiento intenso se transforma continuamente, como en la dínamo de Siemens, en energía magnética mediante un mecanismo conocido como el efecto dínamo. En esencia, tal efecto consiste en que un movimiento en espiral del metal fundido -en las condiciones extremas del interior de la Tierra- es capaz de arrastrar a las líneas de campo magnético, intercambiando la energía de movimiento en energía magnética y amplificando un campo magnético inicialmente débil. Aunque todavía

quedan muchas interrogantes, en el año 2000 se dio un gran avance en la comprensión de la geodínamo cuando se logró por primera vez en dos experimentos independientes, uno en Letonia y otro en Alemania, la generación en laboratorio de un campo magnético espontáneo mediante el efecto dínamo. Ésta es un área de investigación muy activa en el mundo que involucra proyectos experimentales, simulaciones computacionales, estudios geofísicos y observaciones satelitales y que tiene como meta mejorar el entendimiento de nuestro planeta.

# Los peines y la codificación homodínea de imágenes dinámicas

**W. Luis Mochán**

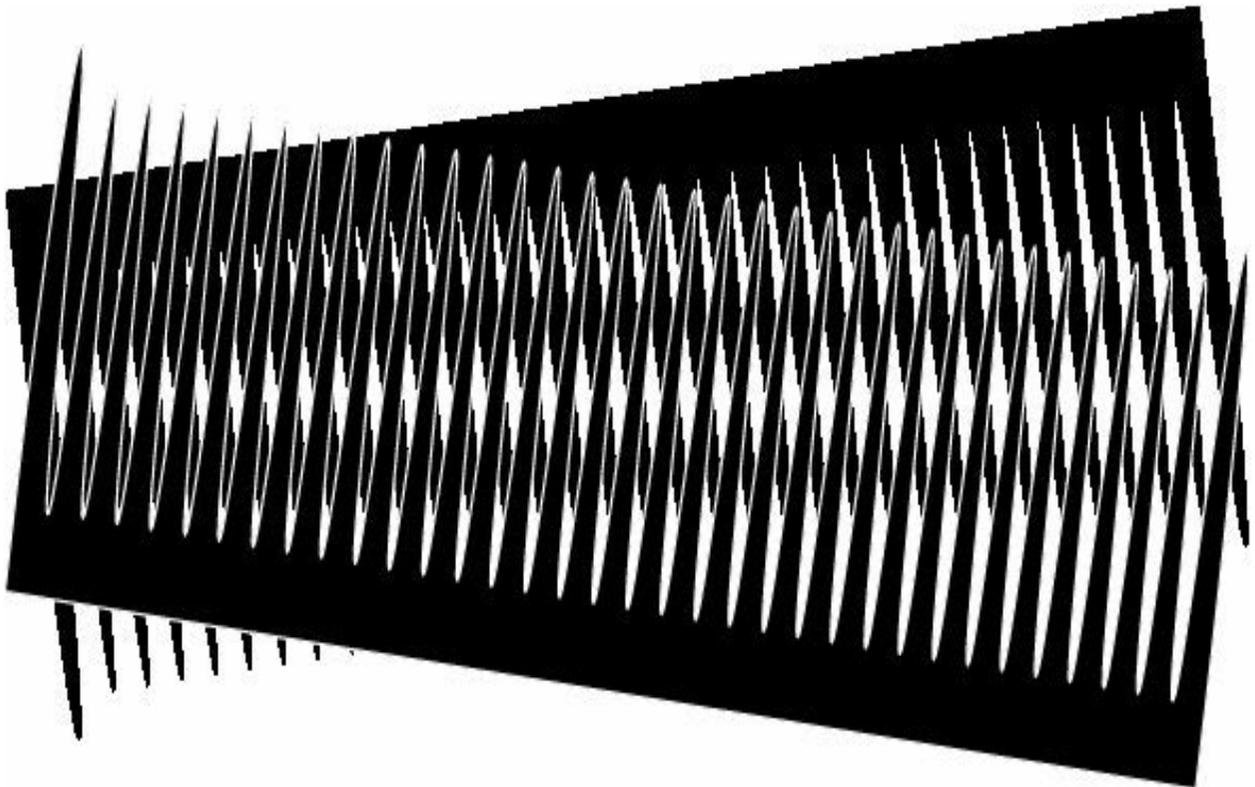
Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Tome un peine. No deseo insinuar que Ud. está despeinado; lo que quiero es invitarlo a hacer un experimento. Tome otro peine, de preferencia idéntico al anterior. Ahora coloque los dientes de uno detrás de los dientes del otro. Lo que verá se parecerá a lo que muestra la figura 1. Note el patrón que emerge. Por ejemplo, la figura muestra líneas horizontales que no forman parte de uno ni otro peine pero que se forman al ver los dientes de uno por entre los dientes del otro. Observe cómo cambia el patrón al inclinar y al mover uno de los peines. Esta clase de patrones, formados por la yuxtaposición de texturas que se repiten regularmente como los dientes de un peine, los alambres en un mosquitero o los hilos de una tela semitransparente, se denominan patrones de moiré. Quizás los haya visto en ciertas telas, donde dan origen a figuras que recuerdan las ondas en el agua.

¿Por qué se forman estos patrones? ¿Cómo describirlos matemáticamente? Considere dos acetatos transparentes colocados uno detrás del otro en cada

uno de los cuales imprimimos una imagen en blanco y negro, o mejor dicho, en transparente y negro. ¿Qué observaremos al verlos? La imagen resultante será opaca en aquellas regiones en las que una zona negra del primer acetato cubra una zona negra del segundo. También quedará negra donde una zona negra del primero cubra una zona transparente del segundo o una transparente cubra una negra. La imagen resultante tendrá regiones transparentes únicamente donde una zona transparente cubra otra transparente. Este resultado está resumido en la figura 2.

Como ilustra la figura, superponer dos figuras impresas en una transparencia es equivalente a multiplicarlas: identificando las zonas opacas con el número 0 y las zonas transparentes con el número 1, la imagen resultante es el producto de las dos imágenes que la conforman. El patrón de líneas ilustrado en la figura 1 resulta entonces de las curiosas propiedades del producto de funciones periódicas, que se repiten regularmente (o casi regularmente). Como ilustra



*Figura 1. Dos peines ligeramente inclinados entre sí y colocados uno detrás del otro. Al observar los dientes de un peine a través de los dientes del otro aparece un patrón de líneas horizontales que no forma parte de ninguno de los dos.*

la figura 3, el producto de dos funciones periódicas con frecuencias ligeramente distintas está formado por una parte que oscila lentamente y otra que oscila rápidamente.

Esta propiedad del producto de oscilaciones es empleada cotidianamente en la radiodifusión: los microfones de una estación de radio recogen señales que oscilan con relativa lentitud, con frecuencias de algunos cientos de Hertz (ciclos por segundo). Estas señales se emplean para modular ondas de radio, con frecuencias altas, típicamente de millones de Hertz. Los aparatos radioreceptores pueden extraer la señal de audio multiplicando la señal de radio por una onda con la frecuencia nominal de la estación de radio. La componente de baja frecuencia de la onda resultante es la señal de audio que es amplificada y enviada a las bocinas para generar sonido. Esta técnica para detectar señales (hay muchas otras) se conoce como detección homodínea.

La discusión anterior muestra que la formación de patrones de moiré entre figuras que oscilan rápidamente en el espacio, como los peines de la figura 1, es análoga a la detección homodínea de señales de audio en la radiodifusión. Sin embargo, los patrones de moiré ofrecen mayor riqueza pues las imágenes que los componen pueden variar a lo largo de diversas direcciones y pueden ocupar distintos planos en el espacio. En el Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM he desarrollado herramientas matemáticas y programas computacionales que permiten la codificación y decodificación homodínea de imágenes tomando para ello conceptos prestados de la óptica no lineal, uno de nuestros temas de investigación. Aprovechando el paralaje dinámico se logró además producir imágenes que, aunque físicamente se hallan fijas, se animan de movimiento visual cuando el observador camina frente a ellas dando origen a una experiencia dinámica pero bajo el control del espectador. El paralaje dinámico consiste en el movimiento aparente de los objetos cercanos con respecto a los objetos lejanos cuando el observador avanza, como ilustra el viejo chiste de los dos pasajeros en un tren comentando el paisaje:

--¿Ya viste los postes de luz al lado de la vía? --Sí. ¿Qué tienen? --Nota lo rápido que se mueven hacia atrás. --Cierto. De regreso vayámonos en poste.

Así como los postes cercanos parecen desplazarse rápidamente hacia atrás con respecto a las montañas lejanas cuando avanzamos velozmente en un tren, al caminar frente a nuestras imágenes inducimos un movimiento aparente entre sus distintos planos, lo cual modifica el patrón de moiré generado. El reto, resuelto mediante una serie de algoritmos originales y un conjunto de programas ad-hoc de computadora fue aprovechar el paralaje dinámico y el efecto moiré para elaborar las animaciones deseadas.

Como una ilustración de los conceptos anteriores, se elaboró una colección de cuadros animados cuyo tema es la óptica física y que pretende introducir de manera atractiva, didáctica e interactiva muchos

×	0	1
0	0	0
1	0	1

*Figura 2. Tabla de superposición de acetatos. Al colocar una zona negra o transparente (renglón superior) encima de una zona negra o transparente (columna izquierda) se obtiene uno de cuatro resultados (cuadro abajo a la derecha) de manera análoga a la tabla de multiplicar binaria, identificando al número 0 con las zonas negras y al 1 con las transparentes.*

conceptos de la física ondulatoria. Estos cuadros conforman la exposición Luz en Movimiento, expuesta temporalmente en *Universum*, el museo de ciencias de la UNAM. Cada uno de los cuadros está formado por la yuxtaposición de dos retículas consistentes en cientos de líneas que difieren apenas de rectas verticales equi-espaciadas. Ambas retículas se hallan impresas en materiales transparentes situados en dos planos distintos y están iluminadas difusamente por atrás. La imagen que observa el espectador no se halla ni en uno ni en el otro plano, sino que emerge sinérgicamente de la superposición de ambos formando un patrón de moiré.

La secuencia de cuadros inicia con una partícula vibrante que ilustra todos los atributos de un oscilador: su amplitud, frecuencia, fase y dirección. A continuación se muestra cómo aparece el movimiento ondulatorio al acoplarse un gran número de osciladores. Se señalan los distintos tipos de ondas y se exploran todos sus atributos, como son su longitud de onda y velocidad de propagación, entre otros. Se presentan ondas cuyos frentes tienen diversas formas planas y curvas y que se propagan en el espacio a lo largo de un sinnúmero de direcciones. El principio de Huygens permite entender dicha propagación y conduce a las leyes de la reflexión y de la refracción. Estas permiten entender el funcionamiento de lentes y espejos y la formación de imágenes en instrumentos ópticos. Por otro lado, se estudia la superposición de ondas, la interferencia constructiva y destructiva, rudimentos de análisis de Fourier y el concepto de grupos de ondas. Tras presentar el patrón de interferencia entre dos ondas coherentes se ilustra el experimento de

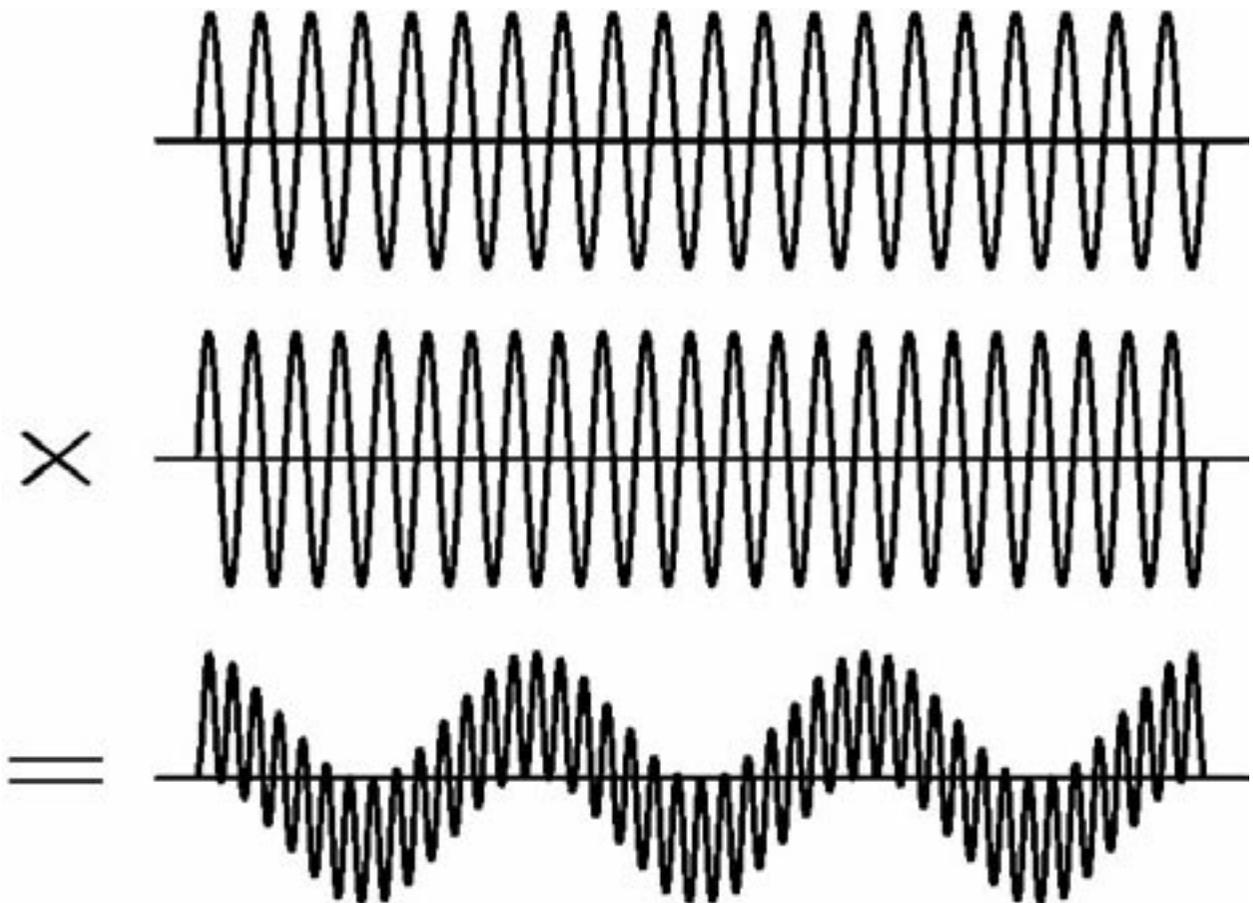
Young, el cual demuestra el carácter ondulatorio de la luz. La interferencia entre ondas contrapropagantes explica tanto el timbre de un instrumento musical como el funcionamiento de un laser. Finalmente, se muestra el carácter electromagnético de la luz mediante el campo cercano y lejano producido por el movimiento de los electrones en los átomos. Un cuadro adicional ilustra la propagación de grupos de ondas y su dispersión normal y anómala incluyendo los fenómenos superluminales que han sido objeto de investigaciones recientes.

Las cédulas de cada cuadro están basadas en preguntas que invitan al visitante a observar y explorar. El nivel de detalle de los cuadros permite aprender de ellos tanto a estudiantes de ciencias físico-matemáticas como a legos y hasta a niños de nivel pre-escolar. No es indispensable observar y entender todos los detalles, algunos de los cuales son demasiado sutiles como serían el límite de resolución de Abbe o el corrimiento de Gouy, para disfrutar la exposición.

El montaje de esta exposición requirió vencer muchos obstáculos técnicos, lo cual se logró durante los primeros meses del 2008 mediante el invaluable, entusiasta y generoso apoyo de un magnífico equipo de expertos en múltiples disciplinas adscritos a la Dirección General de Divulgación de la Ciencia

(DGDC) coordinados por Julia Tagüeña, su entonces directora, por Concepción Ruiz Ruiz-Funes, entonces directora de *Universum* y por Pilar Contreras, directora del Museo de la Luz. Fue exhibida por primera vez en el Museo de la Luz, de abril a septiembre de 2008, aunque algunos prototipos habían sido mostrados previamente en una exposición callejera en Cuernavaca que formó parte del ciclo de conferencias Café conCiencia, y en dos Encuentros de Arte y Ciencia que se llevaron a cabo en el Instituto de Ciencias Nucleares y en el Instituto de Física de la UNAM. La exhibición estuvo alojada desde septiembre de 2008 en la sala de exposiciones temporales A de *Universum* (<http://www.universum.unam.mx/>) y fué clausurada el 13 enero de 2009. Algunos de los cuadros pueden verse en mi página personal <http://em.fis.unam.mx/public/mochan/luzenmovimiento>.

Aunque he demostrado la codificación homódnea de imágenes animadas ilustrando conceptos físicos, la técnica permite mayor expresión creativa y lúdica. Por ejemplo, he ilustrado juglares que balancean varias pelotas a la vez, galaxias espirales en rotación, engranes articulados que rotan en sincronía y ojos que siguen o que rehuyen al espectador. Quizás Ud. pueda sugerir posibles aplicaciones de esta nueva técnica gráfica.



*Figura 3. Gráfica de dos funciones periódicas y de su producto. El producto de dos oscilaciones con frecuencias similares (la superior tiene 20 oscilaciones a todo lo ancho mientras que la de abajo tiene 23) tiene una parte que oscila lentamente (3 oscilaciones) y otra que oscila rápidamente (43 oscilaciones).*



# ¿Qué es un LÁSER?

**Alejandro Ramírez Solís**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Para empezar, las siglas LASER son el acrónimo en inglés de “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, por lo cual los carteles y anuncios que a veces vemos en la calle escritos como “Impresiones LASSER” contienen un error garrafal. En español la palabra correcta se escribe con acento: láser. Dado el tema, la respuesta a la pregunta del título puede darse de varias formas, dependiendo del nivel de profundidad con que se trate, de la extensión en tiempo y en espacio con que se cuente y, sobre todo, de los conocimientos de física cuántica que se tengan. En este caso, dado que nos dirigimos a un amplio público no especializado, haremos una breve recopilación de las ideas fundamentales, tratando de explicar los elementos básicos con algunas analogías en el pequeño espacio que tenemos.

Como ya lo mencionamos en otra entrega titulada “Qué significa la palabra Cuántico”, los procesos de emisión y absorción de radiación (luz visible, ultravioleta, calor, ondas de radio, de TV, rayos X, etc.) por la materia ocurren por saltos y no de manera continua. Esto quiere decir que los niveles de energía de los átomos, moléculas y materiales se encuentran “cuantizados”, como los niveles de una escalera en un edificio; si numeramos a los escalones de la torre de PEMEX, no podemos estar en el nivel 2.7398 ni en el 523.16442 y únicamente podemos ubicarnos en niveles que les corresponden números enteros. Sin embargo, en los átomos, moléculas y materiales los espaciamientos entre los niveles de energía son variables y podemos mencionar aquí, como ejemplo, el caso más simple; en el átomo de hidrógeno el electrón se encuentra atrapado en el primer nivel (escalón  $n=1$ ) a  $-13.6$  electrón-Volts (eV), mientras que el segundo nivel ( $n=2$ ) se encuentra a la cuarta parte en  $-3.4$  eV, el tercer nivel ( $n=3$ ) a la novena parte del primero a  $-1.51$  eV, y así sucesivamente hasta el nivel  $n=\infty$ . Evidentemente, conforme el número entero que etiqueta el nivel crece, la energía del electrón se acerca más y más a cero, con lo cual queda más y más cerca de estar libre para escapar del átomo dejando a su núcleo como un protón solo. Algo muy similar ocurre para todas las moléculas, neutras o ionizadas, es decir, con electrones de más (aniones) o con electrones de menos (cationes) respecto a la molécula neutra. Los niveles de energía superiores aunque existen, no se encuentran ocupados por electrones cuando el átomo o molécula está en su estado fundamental, el más estable.

Aquí podemos preguntar y ¿cómo saben los físicos que los estados excitados existen y cuáles son las energías que les corresponden? La respuesta es

doble. Históricamente la primera respuesta vino a través de los experimentos de fines del siglo XIX; el conocimiento de los estados excitados provino del análisis espectroscópico de la luz emitida por cada tipo de átomo en su forma pura (es decir, sin contaminante alguno). Este análisis consiste en hacer pasar la luz emitida por cada tipo de átomo (o molécula) a través de un prisma, de la misma forma que Newton mostró que la luz blanca (visible) del sol está compuesta por un espectro continuo de luz que va desde el rojo hasta el violeta.

Así, los espectroscopistas descubrieron dos cosas muy importantes para el desarrollo posterior de la teoría cuántica: a) que la luz que los átomos o moléculas absorben o emiten no es continua sino que se presenta únicamente con algunas longitudes de onda muy específicas y, b) que cada tipo de átomo o molécula tiene un espectro (el conjunto de líneas de absorción o emisión) único e inconfundible con el de otro átomo o molécula. El por qué esto ocurría era uno de los dos grandes misterios de la física de fines del siglo XIX hasta que, en 1913, hizo su aparición Niels Bohr y en un acto de genialidad logró explicar correctamente el espectro del átomo más simple (el hidrógeno, que tiene un solo electrón) creando un modelo, considerado ahora como demasiado simple por los físicos actuales, pero que contiene las ideas fundamentales de los procesos de excitación de sistemas cuánticos como átomos, moléculas, plasmas y materiales. Una de las ideas más fundamentales para entender cómo funciona un láser vino de Bohr y es que los átomos generalmente no emiten radiación alguna puesto que se encuentran en su estado más estable, el fundamental o estado base, en el cual todos los electrones se encuentran llenando por pares los niveles más profundos. Bohr propuso que únicamente cuando los electrones que contienen los átomos o moléculas se encuentran en tránsito, o “saltando” de un nivel a otro se emite o se absorbe luz. Aquí podemos regresar a nuestra analogía de un niño saltando de un escalón a otro en un edificio. Cuando el salto es de un nivel de menor energía a otro de mayor energía, la diferencia de energía debe ser pagada por alguien; en el caso del niño esa energía viene de las calorías que tiene disponibles en sus músculos para hacer el trabajo de subir escalones, y en el caso del electrón esa energía viene de la absorción de un fotón (el cuanto o partícula de energía electromagnética). Este proceso es visto como si el átomo hiciera desaparecer un paquete de luz de la frecuencia que corresponde exactamente a la diferencia de energía entre el nivel de salida y el de llegada. Cuando el salto es de un nivel de energía



*Niels Henrik David Bohr*

más alto a uno más bajo ocurre el proceso inverso; en el caso del niño no le cuesta ningún trabajo hacer el salto y la diferencia de energía (el exceso que tenía) se disipa en el ruido que hacen sus zapatos al caer y, sobre todo, se disipa en el calor que produjo el esfuerzo muscular por amortiguar el choque. En el caso de los átomos o moléculas, el salto de electrones de un nivel mayor a un nivel de menor energía produce la emisión de radiación electromagnética. Esta radiación tendrá diferente longitud de onda (o color) dependiendo del tamaño del salto, es decir de la diferencia de energía entre los niveles de salida y de llegada; de luz infrarroja si la diferencia es de décimas o centésimas de eV, de luz visible si la diferencia es del orden de algunos eV, de luz ultravioleta si es de decenas, centenas o miles de eV y de rayos X si es de decenas o centenas de miles de eV.

Ahora sabiendo esta información, lo más importante para nuestra exposición es que las diferencias de niveles son una firma infalsificable de la naturaleza de cada átomo o molécula. Para comprender ahora los elementos básicos de un láser tenemos que introducir algunos conceptos nuevos, como la emisión espontánea y la emisión estimulada. La primera es la que ocurre cuando un átomo ha recibido energía en alguna forma sea ésta de luz o de calor; los fotones emitidos en este tipo de proceso aleatorio, a pesar de tener todos la misma longitud de onda, salen en todas direcciones y con fases diferentes (son incoherentes); esto quiere decir que cuando alguno tiene su onda en un máximo de amplitud, algún otro la tendrá en un mínimo, lo cual producirá efectos de interferencia destructiva, disminuyendo así la intensidad total efectiva de la luz emitida.

La emisión estimulada, base de la generación de radiación de un láser, se produce cuando un átomo en estado excitado recibe un estímulo externo que lo lleva a emitir fotones y así retornar a un estado menos excitado. El estímulo en cuestión proviene de la llegada de un fotón con energía similar a la diferencia de energía entre los dos estados. Los fotones así emitidos por el átomo estimulado poseen fase, energía y dirección similares a las del fotón externo que les dio origen. La emisión estimulada descrita es la raíz de muchas de las características de la luz láser. No sólo produce luz coherente (los fotones salen en fase) y monocroma (de un solo color o longitud de onda), sino que también “amplifica” la emisión de luz, ya que por cada fotón que incide sobre un átomo excitado se genera otro fotón. Pero aquí no debemos olvidar que cuando un átomo recibe radiación externa también está posibilitado para absorberla. El sistema atómico se excita a un estado de energía más alto, pasando un electrón al estado meta-estable del cual puede regresar al estado de menor energía. Este fenómeno de absorción compite con el de la emisión estimulada de radiación y la eficiencia de un láser queda determinada en gran parte por la proporción de átomos que realizan el salto “hacia arriba” contra los que realizan el salto “hacia abajo”.

Esto nos lleva necesariamente al concepto de bombeo óptico. Lógicamente, si queremos que un LÁSER sea intenso debemos primero forzar a la mayor cantidad de átomos posibles a subir a un estado excitado meta-estable, es decir del cual pueden salir y regresar al estado de menor energía, y una vez teniendo esa población grande de átomos excitados, forzarlos a “bajar” a todos en el menor tiempo posible;



*Charles Hard Townes*

para esto se utiliza el proceso mencionado arriba de emisión estimulada. Si esto se logra, habrá un número muy grande de átomos emitiendo luz de la misma longitud de onda y con la misma fase, produciendo luz que llamamos láser. Notamos aquí que el bombeo se provoca mediante una fuente de radiación como puede ser una lámpara, el paso de una corriente eléctrica o el uso de cualquier otro tipo de fuente energética que provoque una emisión.

De este modo un láser es un aparato (o dispositivo) que produce un tipo muy especial de luz. Podemos imaginárnoslo como una super-linterna. Sin embargo, la luz procedente de un láser se diferencia de la de una linterna en cuatro aspectos básicos:

1. La luz de un dispositivo láser es intensa. No obstante, sólo ciertos láseres son potentes. Aunque lo parezca, no se trata de una contradicción. La intensidad es una medida de la potencia por unidad de superficie, e incluso los láseres que emiten sólo algunos milivatios son capaces de producir una elevada intensidad en un rayo de un milímetro de diámetro. En realidad, su intensidad puede incluso ser igual a la de la luz del sol. Cualquier lámpara ordinaria emite una cantidad de luz muy superior a la de un pequeño láser, pero esparcida por toda la sala. Algunos láseres, dependiendo del diseño específico, pueden producir muchos miles de Watts continuamente; otros son capaces de producir millones de Watts en un impulso cuya duración es tan sólo la mil millonésima parte de un segundo.

2. Los haces láser son estrechos y no se dispersan como los demás haces de luz. Esta cualidad se denomina direccionalidad. Se sabe que ni la luz de un potente foco logra desplazarse muy lejos: si se enfoca hacia el firmamento, su rayo parece desvanecerse de

inmediato. El haz de luz comienza a esparcirse en el momento en que sale del foco, hasta alcanzar tal grado de dispersión que llega a perder su utilidad. Sin embargo, se han logrado reflejar haces láser de pocos Watts de potencia sobre la luna y su luz era todavía lo suficientemente brillante para verla desde la Tierra. Uno de los primeros haces láser que se disparó contra la luna en 1962 sólo llegó a dispersarse cuatro kilómetros sobre la superficie lunar. ¡No está mal si se considera que se había desplazado cerca de cuatrocientos mil kilómetros! Actualmente la dispersión lograda es de unos cuantos metros.

3. La luz láser es coherente. Esto significa que todas las ondas luminosas procedentes de un láser se acoplan ordenadamente entre sí. Una luz corriente, como la procedente de un foco, genera ondas luminosas que comienzan en diferentes momentos y se desplazan en direcciones diversas. Algo parecido a lo que ocurre cuando se arroja un puñado de piedritas en un lago. Lo único que se crean son pequeñas salpicaduras y algunas ondulaciones. Ahora bien, si se arrojan las mismas piedritas una a una con una frecuencia exactamente regular y justo en el mismo sitio, puede generarse una ola en el agua de mayor magnitud. Así actúa un láser, y esta propiedad especial puede tener diversas utilidades.

4. Los láseres producen luz de un solo color, es decir, su luz es monocromática. La luz común contiene todos los colores de la luz visible (es decir, el espectro), que combinados se convierten en blanco. Los haces de luz láser ya han sido producidos en todos los colores del arco iris (si bien el más común es el rojo), y también en tipos de luz invisible (infrarrojo y ultravioleta); pero un láser determinado puede emitir



*Gordon Gould*

única y exclusivamente un solo color. Existen láseres sintonizables que pueden ser ajustados para producir diversos colores, pero incluso éstos no pueden emitir más que un color único en un momento dado. Determinados láseres pueden emitir varias frecuencias monocromáticas al mismo tiempo, pero no un espectro continuo que contenga todos los colores de la luz visible como puede hacerlo una bombilla.

### **¿PARA QUÉ SIRVEN LOS LÁSERES?**

La gama de usos de los láseres es sorprendente, hasta el punto de que alcanza una extensión mucho más amplia que la concebida originalmente por los científicos que diseñaron los primeros modelos, y supera en mucho la visión de los primeros escritores de ciencia ficción, quienes en la mayoría de los casos sólo supieron ver en él un arma futurista. También resulta sorprendente la gran variedad de láseres existentes.

En un extremo de la gama se encuentran los láseres fabricados con minúsculas pastillas semiconductoras, similares a las utilizadas en circuitos electrónicos, con un tamaño no superior al de un grano de sal. Gordon Gould, uno de los pioneros en este campo, confesó que le impresionaron cuando fueron presentados. Actualmente estos son los más comunes y se fabrican por miles diariamente para satisfacer la industria

de las computadoras en el mundo. En el extremo opuesto se encuentran los láseres bélicos del tamaño de un edificio, con los que experimenta actualmente el ejército, muy diferentes de las pistolas lanzarrayos que habían imaginado los escritores de ciencia-ficción.

Las tareas desempeñadas por los láseres van de lo mundano (por ejemplo, escritura de CDs y DVDs por millones al día) a lo sorprendente, como el cortado de placas metálicas gruesas, en neurocirugía, en cirugía ocular, en detección espacial, y como un instrumento básico de investigación científica, pero todas comparten un elemento común: son difíciles o totalmente imposibles con cualquier otro instrumento. Exceptuando los pequeños láseres de estado sólido ya mencionados que se incluyen en cualquier computadora, los láseres son aparatos relativamente caros y, por lo general, se utilizan por su propiedad de suministrar la luminosidad, coherencia y la cantidad precisa de energía requeridas en el lugar deseado.

Charles H. Townes, uno de los inventores del láser y ganador del Premio Nobel por desarrollo de su predecesor (el máser), había dicho hace tres décadas que el láser abarcaría una gama muy amplia de campos de aplicación; ya hemos visto que así ocurrió. En entregas posteriores hablaremos del desarrollo del láser, de las ideas nuevas y del papel que jugaron los actores más importantes en su historia.

# Los zumbidos y las ciencias exactas

**W. Luis Mochán**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM-Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Era de noche, me hallaba sumergido en su silencio y oscuridad. Dormía profundamente cuando empecé el zumbido, fuerte, penetrante, agudo. Imposible continuar. Adormilado prendí la luz; volvió el silencio y ni rastro de mi visitante. La apagué. El sonido volvió de inmediato, más fuerte que antes. Se detuvo. Un cosquilleo en mi oído provocó un reflejo; me golpeé la cabeza. Otra vez el ruido, pero acompañado de otro, como una trompetilla, más agudo aún. Volví a prender la luz. Otra vez silencio, roto abruptamente por un zumbido grave. Esta vez lo pude ver, dando vueltas al foco y golpeando la pared. Un coleóptero. Recordé, la ventana se quedó abierta toda la tarde; seguramente, la casa estaría llena de mosquitos al acecho. Resignado, me levanté, preparé un té y me senté a reflexionar.

Ahuyentado el sueño, fui víctima de mi deformación profesional. Siendo físico, mi trabajo es hacer preguntas y, en algunas ocasiones, contestarlas. ¿Por qué el sonido del mosquito es agudo? ¿Por qué el del escarabajo es grave? ¿Por qué el de la mosca es intermedio, ni tan agudo ni tan grave? ¿Qué determina el tono del zumbido de un insecto? Desde luego, hay diferencias notables entre los insectos. Los coleópteros tienen boca dispuesta para masticar, caparazón consistente y dos élitros córneos que cubren dos alas membranosas mientras que los mosquitos son dípteros de cuerpo cilíndrico con dos antenas, dos palpos en forma de pluma y una trompa recta [Diccionario de la lengua Española de la Real Academia, 22a ed.]. Pero ¿cuáles diferencias son circunstanciales y cuáles son esenciales para entender el tono del zumbido? Seguramente, Ud. sospecha la respuesta: el tamaño.

La experiencia nos muestra que los insectos pequeños producen sonidos más agudos al volar que los grandes. La nueva pregunta ¿cómo depende del tamaño el tono, la frecuencia del sonido? Aquí podríamos proceder de varias maneras. Una de ellas consistiría en hacer experimentos: reunir muchos insectos de diversas especies y/o muchos insectos de la misma especie pero de distintas edades y tamaños, registrar sus medidas y su peso, motivarlos a volar en algún tipo de ambiente confinado donde podamos grabar el sonido que producen. Posteriormente, podríamos desplegar el sonido grabado en un osciloscopio y hacerle un análisis espectral para hallar las frecuencias dominantes que lo componen, dibujar gráficas para buscar correlaciones entre las distintas mediciones realizadas, proponer expresiones matemáticas que capturen la esencia de dichas correlaciones y hacer regresiones estadísticas para

minimizar los errores entre dichas expresiones empíricas y las observaciones, obteniendo así los mejores valores para los coeficientes que aparezcan en las fórmulas, etc.

La otra forma de proceder, más viable en el transcurso de una noche de desvelo y más acorde a mi formación teórica, consiste en la elaboración de un modelo. Veamos. ¿Por qué se sostiene un insecto en el aire? Sabemos que los insectos tienen masa y que todas las masas son atraídas hacia el centro de la tierra por la fuerza de la gravedad

$$F_g = mg$$

donde

$$m$$

es la masa y

$$g \approx 10^3 \text{ cm/s}^2$$

es la aceleración de la gravedad en la superficie de la tierra donde

$$10^3$$

significa un uno seguido de 3 ceros, i.e., 1000.

La masa del insecto es igual a su densidad (masa por unidad de volumen)

$$\rho_i$$

multiplicada por su volumen. Podemos aproximar la densidad de un insecto por la densidad del agua

$$\rho_i \approx 1 \text{ gr/cm}^3$$

de la cual se componen mayoritariamente todos los seres vivos y podemos aproximar su volumen por el producto largo por alto por ancho

$$\approx L \times L \times L = L^3$$

Donde

$$L$$

es su tamaño.

Más adelante discutiré sobre el uso de aproximaciones burdas como éstas, conocidas genéricamente dentro del gremio como aproximaciones

de elefantes esféricos. Resumiendo, (ecuación 1)

$$F_g = \rho_i L^3 g$$

Si el insecto no cae es porque está sujeto a una fuerza igual y opuesta, la fuerza que ejerce el aire sobre las alas. De acuerdo a la tercera ley de Newton, ésta última es igual y opuesta a la fuerza

$$F_a$$

que ejercen las alas sobre el aire. Por lo tanto, la fuerza gravitacional

$$F_g$$

que ejerce la Tierra sobre el insecto debe ser igual a la fuerza

$$F_a$$

que ejercen las alas sobre el aire. De acuerdo a la segunda ley de Newton, la fuerza es igual al cambio de su ímpetu por unidad de tiempo, por lo cual debemos analizar el ímpetu (es decir, masa por velocidad) que adquiere el aire debido al batir de las alas.

En un aletazo la superficie del ala se mueve una cierta distancia, barriendo cierto volumen (Fig. 1) ¿Cuánto mide dicho volumen? El tamaño del ala es del orden del tamaño

$$L$$

del insecto, por lo cual su área es del orden de

$$L \times L = L^2$$

La distancia recorrida durante un aleteo no es ni mucho más grande ni mucho más pequeña que

$$L$$

por lo cual el volumen barrido es del orden del area por el recorrido

$$\approx L^2 \times L = L^3$$

Llamando

$$\rho_a \approx 10^{-3} \text{ gr /cm}^3$$

a la densidad del aire, la masa de aire barrida por un aletazo es del orden de

$$\rho_a L^3$$

Cada vez que el insecto aletea, esta masa se mueve una distancia del orden de

$$L$$

por lo cual la velocidad que adquiere es del orden de

$$L / T = L v$$

Donde

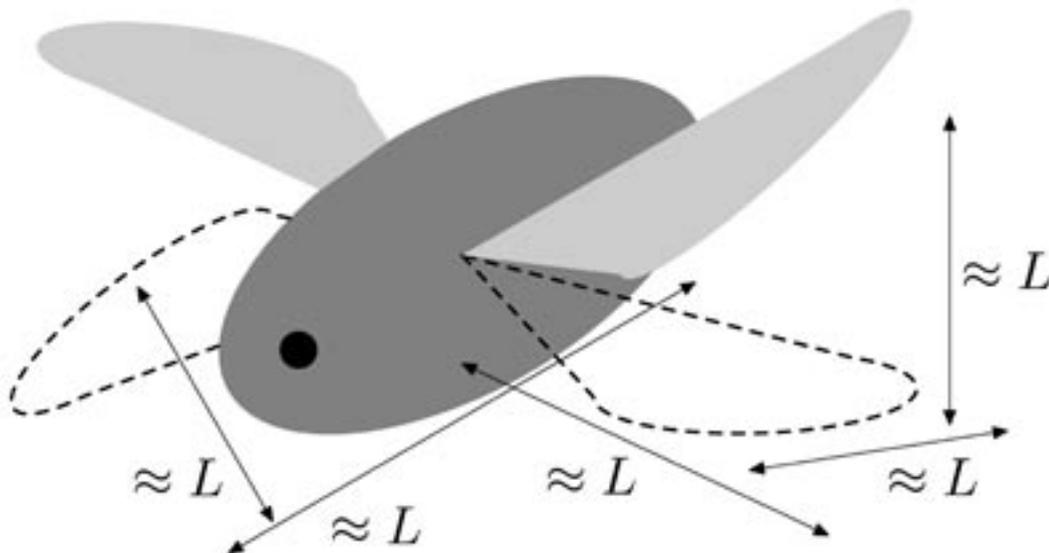


Figura 1: Visión esquemática de un insecto volador, según un físico. Se muestran las alas en su posición superior. Con una línea punteada se muestra también su posición inferior. Se indican las distancias relevantes, tales y como la longitud y ancho del cuerpo, el largo y ancho de las alas y la distancia que recorren entre su posición superior y su posición inferior. Todas estas distancias se consideran aproximadamente iguales entre sí e iguales al tamaño L del insecto.

$$T = 1 / \nu$$

es el tiempo que tarda cada aleteo y

$$\nu$$

es el número de aleteos por unidad de tiempo, es decir, la frecuencia del aleteo y por lo tanto del zumbido que genera. Luego, el ímpetu que adquiere el aire en un aleteo es del orden de

$$\rho_a L^4 \nu$$

Habiendo

$$\nu$$

aleteos por unidad de tiempo, el ímpetu que adquiere el aire por unidad de tiempo es

$$\rho_a L^4 \nu^2$$

Como discutimos arriba, éste es igual a la fuerza que las alas ejercen sobre el aire,

$$F_a = \rho_a L^4 \nu^2$$

y por lo tanto es igual a la fuerza que la gravedad ejerce sobre el insecto. Igualando (ecuación 2)

$$F_g = F_a$$

y empleando las ecuaciones (1) y (2) obtenemos

$$\rho_a L^4 \nu^2 \approx \rho_i L^3 g$$

de donde despejamos (ecuación 3)

$$\nu \approx \sqrt{\frac{\rho_i g}{\rho_a L}} \approx \frac{10^3}{\sqrt{L}} \text{ Hz cm}^{1/2}$$

La última expresión en la ecuación (3) nos proporciona la frecuencia

$$\nu$$

en Hertz (número de oscilaciones o aletazos por segundo) cuando sustituimos el tamaño

$$L$$

en centímetros.

Ilustremos los resultados anteriores aplicándolos a un mosquito. Su tamaño es de aproximadamente 2 mm=(1/5)cm, por lo cual la frecuencia de su

zumbido puede calcularse como

$$\nu \approx 10^3 / \sqrt{1/5} \text{ Hz} \approx 2000 \text{ Hz}$$

Si desea saber cómo suena esta frecuencia, pulse en un piano la tecla do que se halla tres octavas arriba del do central; si no sabe cómo, consiga a algún amigo pianista. Hice la prueba y me parece que sí corresponde al tono de un mosquito (aunque el timbre del piano es muy distinto). En cambio, un escarabajo de 3 cm haría un ruido con una frecuencia

$$\nu \approx 10^3 \sqrt{0.3} \text{ Hz} \approx 550 \text{ Hz}$$

poco más agudo que el do que sigue del do central. El lector interesado podría aplicar el resultado a otros insectos de su interés para predecir su sonido. Incluso, podría ir más allá y aplicar esta expresión a otros seres voladores tal como el colibrí. El resultado podría emplearse al revés, para estimar el tamaño de un insecto a partir del sonido que produce. Quiero enfatizar que en la deducción previa empleé el símbolo *aproximadamente igual*

≈

en varias ocasiones, en lugar de haber empleado el símbolo igual (=). Ello obedece a que el ejercicio anterior corresponde a una estimación de la frecuencia del zumbido y no a un cálculo exacto. Por una parte, en la estimación se llevaron a cabo una serie de aproximaciones. Por ejemplo, la aceleración de la gravedad se tomó como

$$1000 \text{ cm/s}^2$$

y no como los 981 reportados en los libros de texto. La densidad del aire se aproximó como

$$10^{-3} \text{ gr/cm}^3$$

en lugar de emplear un valor más preciso como

$$1,204 \times 10^{-3} \text{ gr/cm}^3$$

Esto introdujo errorcillos menores en el cálculo los cuales quizás no valdría la pena ni siquiera intentar corregir. Entre otros motivos, usar números como el 1.204 de arriba sería una quimera, pues la densidad exacta del aire depende de su temperatura, de la humedad y de la altura sobre el nivel del mar; pretender una precisión exagerada en un cálculo que se aplicará a experimentos poco controlados es, al menos, irrisorio. Desconfíe de quien le presente resultados con más *dígitos significativos* que la precisión alcanzable; probablemente sea alguien que no entienda de lo que habla. Por otra parte, se realizaron otro tipo de

aproximaciones mucho más fuertes. Por ejemplo, ignoramos el hecho de que los insectos tienen una geometría compleja que no puede caracterizarse completamente en términos de un sólo *tamaño*

$L$

De la misma manera, ignoramos el hecho de que la longitud de las alas puede ser muy distinta al tamaño del cuerpo, que su geometría es compleja y que su movimiento no es un desplazamiento rígido. Asimismo, ignoramos que la velocidad del ala no es una constante y, peor aún, ignoramos que el ala se mueve de abajo hacia arriba además de moverse de arriba hacia abajo, por lo cual la eficiencia con la que se imparte ímpetu al aire es menor al 100 %. No debería sorprendernos que al aplicar la ecuación anterior a un insecto específico encontremos grandes errores; quizás nuestra estimación arroje un número dos o tres veces mayor o menor que el real. Dicha clase de errores podría corregirse reescribiendo nuestro resultado como

$$\nu = \alpha \sqrt{(\rho_i / \rho_a) g / L}, \text{ donde } \alpha$$

es algún número adimensional que esperamos sea de orden uno y que capture los efectos de la geometría específica y de las propiedades mecánicas y aerodinámicas del tipo de insecto que estudiemos. El cálculo de

$\alpha$

sería una tarea bastante complicada, aunque su determinación experimental sería relativamente simple siempre y cuando la fórmula anterior se cumpla.

Nuestra estimación puede resumirse diciendo que para insectos de una especie dada debe haber una relación inversamente proporcional entre la frecuencia del zumbido que producen y la raíz cuadrada de su tamaño, es decir, el producto

$$\nu L^2$$

debe ser aproximadamente constante para todos los individuos de especies con una geometría similar. El valor de la constante podría ser un parámetro numérico

útil para caracterizar a dicha especie. Los lectores familiarizados con la ingeniería o con la física sabrán que este resultado podría haberse obtenido de manera mucho más sencilla, sistemática y directa empleando una técnica conocida como análisis dimensional. Debo confesar que no he hecho ningún experimento para intentar verificar la expresión anterior ni he consultado la literatura científica para indagar su validez. Éste sería un proyecto interesante, quizás para algún estudiante de nivel medio. Siempre es mejor realizar un experimento cuando ya hemos desarrollado un modelo, aunque sea simplista, de lo que esperamos obtener. Parafraseando a J. A. Wheeler en su libro *Spacetime Physics*, es un imperativo moral adivinar cual será el resultado de un experimento o de un cálculo detallado antes de realizarlo. De acertar habremos fortalecido nuestra intuición; de no hacerlo, habremos obtenido una lección. Por ejemplo, si aplicáramos nuestra teoría a un ave como un águila, seguramente nuestra teoría fallaría. Ello indicaría que algo importante del vuelo de las aves ha escapado a nuestro análisis. En efecto, la fuerza que sostiene a las aves en vuelo proviene mayormente no de la masa de aire desplazada al aletear sino de la fuerza de sustentación que a su vez proviene del movimiento del ave a través del aire. Para seres voladores muy pequeños aparecería otra fuerza que no hemos tomado en cuenta aquí: la fuerza viscosa. Realicé una pequeña estimación, en el espíritu de la ilustrada en este artículo y obtuve que esta sería dominante sólo en seres voladores microscópicos, de alrededor de 10 micras de tamaño o menos. Por lo tanto, me sorprendería que la relación obtenida arriba fallara en insectos. Sin embargo, si así fuera, seguramente podríamos aprender algo nuevo de sus fallas.

La física es conocida como una Ciencia Exacta. Lo que quise mostrar en este pequeño artículo es que en muchas ocasiones la física se emplea para realizar estimaciones aproximadas, caricaturas de la realidad, en lugar de cálculos exactos. En muchas ocasiones estas estimaciones nos conducen de manera rápida a un entendimiento más profundo de nuestra realidad, como intenté ilustrar con un ejemplo tan modesto como el zumbido de los mosquitos.

Los mosquitos los envió Dios para enseñarle humildad al hombre...y un poco de física.

# Descubriendo anillos

**Luis Benet**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Cuando hablamos de anillos planetarios, la imagen que tenemos en mente corresponde a los hermosos anillos de Saturno, que esencialmente desde su descubrimiento le dieron a este planeta cierto carácter singular y enigmático en el Sistema Solar: Saturno era el planeta anillado.

En 1610, tras descubrir los satélites (galileanos) de Júpiter y las fases de Venus, Galileo Galilei [1564-1642] dirigió el telescopio de su propia manufactura a Saturno. Dada la resolución tan limitada de su telescopio (con unas 20 veces de aumento), las primeras observaciones sugirieron que Saturno tenía dos grandes lunas a cada lado. Sin embargo, a diferencia de los satélites de Júpiter que Galileo descubrió años antes, las lunas permanecían estacionarias. En 1612 Galileo volvió a observar Saturno; la rara sorpresa fue que esas lunas o protuberancias habían desaparecido. Observaciones subsecuentes de Saturno generaron una variedad de interpretaciones que desencadenó el “enigma de las protuberancias” de Saturno. En 1656, Christiaan Huygens [1629-1695] dedujo de sus observaciones y concepciones filosóficas la explicación correcta: Saturno está rodeado por “un anillo delgado y plano, que no lo toca en ningún punto, e inclinado respecto a la eclíptica”. La desaparición y reaparición de los anillos se explica como el paso de la Tierra por el plano ecuatorial de Saturno, donde los

anillos se encuentran.

Pero Saturno seguiría (y sigue) brindando sorpresas. El descubrimiento en 1676 de una división en los anillos de Saturno por Jean Dominique Cassini [1625-1712] originó la idea de que los anillos de Saturno están compuestos por múltiples satélites. Esto, a su vez, convirtió a este planeta en un paradigma de la estructura del Universo hasta el siglo XIX. Immanuel Kant [1724-1804] llevó el modelo del disco a las nebulosas observadas, que hoy sabemos que son galaxias constituidas por  $10^{12}$  (un 1 seguido por 12 ceros) estrellas, y generó una teoría sobre la formación estelar. El debate sobre la solidez de los anillos se mantuvo durante más tiempo, hasta que en 1857 James Clerk Maxwell [1831-1879] mostró que los anillos de Saturno sólo podían consistir de un número indefinido de pequeñas partículas; de hecho, Pierre-Simon Laplace [1749-1827] y Maxwell habían mostrado que un anillo sólido sería inestable. La propuesta de Maxwell fue confirmada en 1895 por James E. Keeler [1857-1900], quien mostró con observaciones espectroscópicas que la velocidad de las partículas varía radialmente siguiendo las leyes de Kepler. Durante el siglo XX se reconoció y explicó dinámicamente la delgadez extrema de los anillos, y se estableció espectroscópicamente que el hielo de agua es el constituyente principal de los anillos de



Imagen de los anillos de Saturno obtenida por Cassini, simulando un eclipse total de Sol (PIA08329. Cortesía de NASA/JPL-Caltech).



*Imagen de los anillos de Urano mostrando a Cordelia y Ofelia (PIA01976. Cortesía de NASA/JPL-Caltech).*

Saturno. Sin embargo, la pregunta de por qué Saturno es el único planeta que posee anillos no había sido contestada; Saturno seguía siendo el planeta anillado.

La situación tuvo un inesperado giro a finales de 1977. Durante una campaña de mediciones de la ocultación de una estrella por Urano, encaminadas a estudiar la atmósfera de este planeta, sorprendentemente se observó que la luz de la estrella mostraba cortas interrupciones antes y después del ocultamiento por el planeta, las cuales eran simétricas. La explicación era clara: Urano estaba rodeado por 9 anillos delgados. Estas observaciones mostraron que los anillos de Saturno no eran únicos ni una particularidad de Saturno, sino evidenciaron que los anillos de Urano eran muy distintos a los de Saturno: los anillos de Urano eran delgados, con bordes muy bien definidos, opacos, inclinados y algunos de ellos eran excéntricos. Cada una de estas propiedades estructurales no correspondía al entendimiento de los anillos planetarios. En 1979, Peter Goldreich y Scott Tremaine propusieron una nueva teoría para el confinamiento de los anillos delgados de Urano. La teoría del pastoreo proponía la existencia de dos lunas alrededor del anillo que lo mantenían confinado a través de las interacciones gravitacionales.

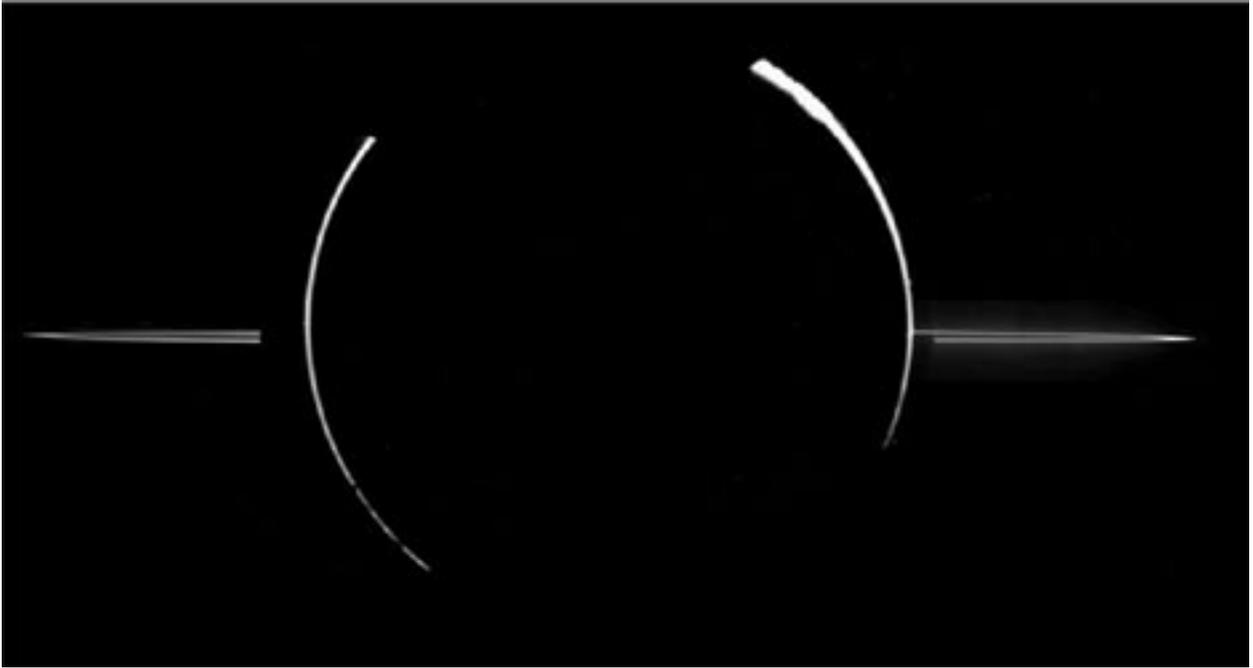
Observaciones similares en la década de los 80 fueron realizadas en torno a Neptuno. En un principio, las observaciones mostraban que no había evidencia de anillos opacos como los de Urano, excepto por un eventual bloqueo de la luz de la estrella ocultada, que sólo ocurría de un lado del planeta. Como “anillos de un lado” se consideraban imposibles, estas mediciones se interpretaron como errores experimentales. En 1984 mediciones conducidas por dos equipos independientes mostraron que la ocultación de la luz sí ocurría en tan sólo uno de los lados del planeta. Esto confirmó la existencia de anillos parciales.

En su viaje por Júpiter, el Pioneer 11 había detectado la desaparición de los cinturones de radiación de este planeta, que podía ser explicada con la existencia de un anillo alrededor del planeta. El Voyager 1 envió evidencia de tal anillo, lo que hizo que se reprogramaran las imágenes del Voyager 2, que poco tiempo después demostró la existencia de los anillos de Júpiter. Los anillos de Júpiter resultaron ser distintos a los de Saturno y a los de Urano: eran opacos, débiles y estaban formados por polvo muy fino. En el verano de 1979 el Pioneer 1 fue la primera nave que se acercó a Saturno. En la trayectoria de aproximación, el Pioneer detectó un nuevo anillo, hoy conocido como el anillo F, y días después otro anillo, el anillo G. Los Voyager, equipados con mejores cámaras que el Pioneer, enviaron imágenes inesperadas de los nuevos anillos. En particular, el anillo F, resultó ser delgado, elíptico, consistía de varias hebras y exhibía acumulaciones irregulares de materia. Asimismo, se descubrió que este anillo resultó tener dos lunas que orbitan a su alrededor, Prometeo y Pandora. Esto constituyó inicialmente la confirmación de la teoría del pastoreo de Goldreich y Tremaine; estudios posteriores mostrarían que la teoría del pastoreo no se puede aplicar al anillo F. Hasta la fecha, el origen de la estructura del anillo F sigue siendo un misterio. Las imágenes de los Voyager, y las de Cassini actualmente, muestran la existencia de nuevos detalles de los anillos de Saturno: patrones ondulatorios, estelas, bordes finos, nuevas divisiones más pequeñas en los anillos y la existencia de numerosísimas pequeñas lunas orbitando el planeta. Con esta creciente información también hay nuevas preguntas.

De igual manera, los acercamientos del Voyager 2 a Urano en 1986 y a Neptuno en 1989 aportaron datos importantes sobre los anillos de estos planetas. En Urano, se descubrieron las lunas Cordelia y Ofelia, que pastorean al anillo  $\epsilon$ . Dichas lunas confirman la teoría del pastoreo, sin embargo, hasta la fecha no se ha encontrado nuevas lunas que pastoreen los



*Imagen de los anillos de Neptuno; el anillo externo muestra los llamados arcos de Adams (PIA01493. Cortesía de NASA/JPL-Caltech).*



*Mosaico de los anillos de Júpiter producido por la sonda Galileo ocultando al Sol (PIA01621. Cortesía de NASA/JPL-Caltech).*

anillos restantes internos de Urano, de los que se conocen 10 anillos delgados, y 2 anillos más fueron descubiertos recientemente. En el caso de Neptuno, el Voyager 2 descubrió varias lunas, entre las cuales está Galatea, que pastorea internamente al anillo que contiene los hoy llamados arcos de Adams: Liberté, Egalité, Fraternité y Courage. Hoy sabemos también que Neptuno tiene 5 anillos.

Los anillos planetarios son sistemas planos de muchísimas partículas que colisionan entre sí, que están confinados por la fuerza gravitacional del planeta madre y perturbados por el achatamiento del planeta y la atracción de las lunas cercanas. El interés por los anillos planetarios radica en que son los laboratorios más cercanos donde podemos estudiar la evolución de discos planos, los cuales, en última estancia constituyen la base de nuestro entendimiento sobre la formación de estrellas y sistemas planetarios.

La historia de los descubrimientos observacionales de anillos planetarios continúa hoy a través de la sonda Cassini, que se encuentra actualmente (2008) alrededor de Saturno, enviándonos información sobre el planeta, sus lunas y sus anillos. Lo importante es que dicha historia sigue. Uno de los estímulos particulares puede ser el encontrar siempre tanta belleza como enigmas no resueltos.



*Imagen del enigmático anillo F de Saturno, con sus dos lunas pastoras Prometeo y Pandora (PIA07712. Cortesía de NASA/JPL-Caltech).*



# Las simetrías ocultas y el caos

**Kurt Bernardo Wolf**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

A los físicos teóricos a menudo nos resulta difícil platicar a nuestros amigos que no son científicos, a qué nos dedicamos –en concreto. Y entonces recurrimos al “se puede aplicar en...” óptica, láseres, procesamiento paralelo de señales, análisis de imágenes pixeladas, pinzas ópticas, etc. Pero la verdad es que en mi cubículo no hay instrumentos ópticos ni rayos láser; sólo libros, tesis, reportes, artículos, notas de cursos y papeles burocráticos, ocupando doce gavetas de archiveros y seis cajones activos. Por otra parte, en mi lugar de trabajo se siente espacio y es tranquilo durante las noches. Cumpliendo con el número esperado de artículos de investigación publicados en revistas internacionales, se puede uno dedicar a vagar por el edificio de la ciencia, visitando otras especialidades, correspondiendo con colegas en el mundo, o hilando algunas ideas sobre las simetrías que encontramos en las ecuaciones que describen la naturaleza.

Un rostro simétrico nos parece bello en el mismo sentido estético que nos produce estar frente al Partenón, o recoger una estrella de mar de cinco picos; un placer similar al que habrán tenido los pitagóricos al contemplar las veinte caras del icosaedro, el último de los cinco poliedros regulares en tres dimensiones. Es una lástima que no hayan sabido de los seis polítopos regulares que descubrió Donald Coxeter (1907–2003), los cuales existen en un espacio de cuatro dimensiones; el último de ellos, el exacosioedroide, tiene 620 ‘caras’ de tres dimensiones. “Simetría” significa “con/en medida,” con justo balance. En la física matemática se precisa el término aplicándolo a sistemas o interacciones que son invariantes bajo algún grupo de transformaciones. La simetría del icosaedro, por ejemplo, está generada por las 60 rotaciones y reflexiones que lo llevan de una posición a otra indistinguible de la anterior –a menos que marquemos sus caras, en cuyo caso diríamos que existe una simetría rota. El desarrollo de la física de altas energías nos ha llevado a reconocer simetrías entre la plétora de partículas elementales, simetrías que son rotas por marcas como la carga eléctrica, extrañeza y número bariónico.

Yo estudié con el Profesor Marcos Moshinsky (1921-2009), reconocido como el físico teórico más prominente de México por sus trabajos pioneros en modelar el núcleo atómico y predecir muchas de sus propiedades. Su herramienta de trabajo era la teoría de grupos, sobre la cual no distraeré al lector, salvo para decir que trata de la formalización de la simetría. Durante un tiempo, el Dr. Moshinsky llevó amistad con el pintor David Alfaro Siqueiros

(1896–1974), quien le enseñó algunos de los bocetos sobre los cuales trabajó para ejecutar sus murales más conocidos. Estos bocetos muestran las líneas rectoras en cuyas intersecciones están los elementos clave de la obra, sus simetrías ocultas, las que el público no ve directamente, pero que impactan al observador. Los muchos cuadros con el tema de la Última Cena, desde da Vinci hasta Dalí, contienen reconocibles líneas que dan balance a las masas de color y guían la mirada sobre avenidas de atención. El genio del artista consiste en romper la simetría del rectángulo de manera sutil pero sorprendente, como la música de Bach, que repite un tema puntuándolo con acertadas variaciones. Un libro exquisito, “Gödel, Escher, Bach,” de Douglas R. Hofstadter interpreta los sonidos, las imágenes y las matemáticas como encarnaciones de la simetría que nuestra especie encuentra placentera.

Puedo dar un ejemplo más próximo, en el que trabajé un rato: el “ojo de pez” de Maxwell. Éste es un medio óptico inhomogéneo que fue descrito por el físico inglés a mediados del siglo XIX, y que en la actualidad se emplea en diseñar antenas de radar que corrigen el desfaseamiento entre anillos concéntricos del frente de onda, problema común en las antenas parabólicas viejas. En este medio los rayos de luz, o los frentes de onda del radar, se propagan en círculos –en vez de hacerlo sobre líneas rectas como en medios homogéneos. Y sucede –tendría que escribir las ecuaciones– que la simetría de este sistema es la misma de la que gozan los átomos hidrogenoides: simetría bajo rotaciones en cuatro dimensiones. En el átomo de hidrógeno es fácil reconocer la simetría bajo rotaciones en tres dimensiones, puesto que la atracción entre las cargas del protón y del electrón depende solamente de su distancia relativa, y no de su orientación en el espacio. Pero la simetría bajo rotaciones en cuatro dimensiones se debe a que las ecuaciones de movimiento del ojo de pez y del átomo se pueden transformar a las de una partícula libre moviéndose en una esfera –de cuatro dimensiones. Las propiedades físicas manifiestas de este sistema tienen contrapartes directas en los otros dos, que son menos evidentes. Las rotaciones en la cuarta dimensión intercambian las órbitas elípticas del electrón, o de los planetas alrededor del sol, o de las trayectorias de las señales dentro de las antenas de radar, conservando su energía. Aquí avanzamos sobre los hombros de gigantes: Kepler (1571–1630), Newton (1643–1727), Maxwell (1831–1889) y Bohr (1885–1962), además de decenas de físicos que durante los últimos cincuenta años han gustado de explorar sus simetrías.



**MARCADORES DE TIEMPO** *"Estos poco apreciados señores introducen así una regularidad temporal, un marcapasos cuya simetría rompe el caos del tráfico..."*

En efecto, las simetrías van aparejadas con leyes de conservación. Si las leyes de movimiento de un sistema son simétricas y no cambian en el tiempo, se conserva la energía; si no cambian de un lugar a otro, se conserva la cantidad de movimiento (masa por velocidad); si no dependen de la orientación en el espacio, se conserva el momento angular (cantidad de movimiento por radio de giro). La conservación de carga, extrañeza y otros números cuánticos se debe a invariancias ocultas que se descubren en las ecuaciones.

El caos es la antípoda de la simetría. Su significado original, (Tohu ve'vohu) en las primeras líneas de la Biblia, es desconocido, pero debe ser similar al de otras cosmogonías que comienzan con caos. Sin embargo, en el último medio siglo el concepto de caos ha sido objeto de estudio matemático y su perfil se ha precisado considerablemente. No se trata de la ausencia de leyes de movimiento, sino de las condiciones aleatorias del entorno, como mesas de billar cuyos lados no son paralelos sino arbitrarios. Allí, trayectorias inicialmente cercanas se separan con cada rebote sobre las paredes. Análogamente, en un sistema planetario con tres o más cuerpos de masas

comparables, éstas pueden mantenerse en órbitas cuasi-estables por largos periodos, pero terminar con la eyección de una de sus componentes. El creciente poder del cómputo electrónico hace factible seguir la evolución de estos sistemas en lo que se denominan experimentos numéricos, y así determinar probabilidades relativas en el desarrollo y trayectoria de un huracán, por ejemplo.

En el Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM en Cuernavaca tenemos un grupo muy fuerte que trabaja sobre la teoría del caos, entre ellos los Dres. Thomas Seligman y François Leyvraz, con especialidad en sus aspectos cuánticos. El caos satura el cosmos realmente existente: el batir de alas de una mariposa en Shanghai puede llegar a desencadenar, meses más tarde, un huracán en el Caribe; fluctuaciones aleatorias en el universo temprano llevaron a la distribución actual de cúmulos galácticos. El rompimiento del caos puede ocurrir por simetrías accidentales, como los anillos de Saturno bajo resonancias entre sus lunas pastoras, o la forma específica de un violín Stradivarius. El caos se reduce así a la superficie de un volumen de simetría. Las aplicaciones de la teoría son insospechadas; como ejemplo me gusta citar una investigación llevada a

cabo en el Centro Internacional de Ciencias AC por dos visitantes, cuya atención fue captada por el tránsito de peseras en la ciudad de Cuernavaca. Publicaron un artículo en una revista inglesa bien conocida, titulado “Porqué en Cuernavaca los autobuses no llegan de a tres.” Porque en Londres, donde se establecen horarios para los buses, digamos que un grupo de personas sale de un cine y por recogerlos el bus se retrasa un poco, y por ello le toca recoger a más pasajeros que lo esperaron más tiempo río abajo, lo cual lo retrasa más. Así, lo alcanzará el siguiente bus y ambos andarán llenos y lentos; mientras, se reúne más gente que espera la llegada del primero –y segundo, hasta que un tercero alcanza a los dos primeros; y así recursivamente *ad infinitum*. Los investigadores demostraron (con métodos matemáticos precisos) que en Cuernavaca no sucede lo mismo porque las concesionarias contratan apuntadores que avisan a cada chofer sobre qué tan adelante va su compañero de línea, para acomodar su velocidad de acuerdo. Estos poco apreciados señores introducen así una regularidad temporal, un marcapasos cuya simetría rompe el caos del tráfico, al menos en lo que se refiere a los tiempos entre peseras en Cuernavaca.

Una táctica similar puede funcionar para romper partes del caos que forma el resto del tráfico:

utilícese el tiempo oficial de la radio y la televisión para recordar el “uno por uno” en confluencias de calles estrechas; no se estacione en las paradas de los autobuses; recálquese que en glorietas la preferencia corresponde a los que circulan saliendo de ella – como en los elevadores o en el metro– y no como en La Paloma, Zapata o Tlaltenango (y califíquese a los agentes de tránsito para levantar multas correctamente). Los hábitos de buen manejo son parte de la gramática social que da sentido a la comunicación (no verbal) entre conductores. Quienes hemos estado en Ensenada por ejemplo, habremos notado que allí conducen “a la americana” (no es cierto, también los europeos lo hacen –hasta los italianos), y el tránsito sí es más fluido. El cambio entre la gramática del tráfico agresivo y del civil fue bastante rápido en España y así podría serlo en Cuernavaca. Así habrá sido la decisión, a principios del siglo XX en cada país, entre circular sólo por la derecha, o sólo por la izquierda (simetría), o escoger carriles al azar (el caos).

La dialéctica entre la simetría y el caos se puede estudiar *per se*, en los muchos sistemas y problemas que nos presenta la naturaleza, o en la tecnología que hace uso de ambas, y que ha llegado a aplicarse con inesperado buen éxito en algunos nichos de la vida cotidiana.



# Las guitarras, los espejos, las fluctuaciones cuánticas y las matemáticas del infinito: el efecto Casimir

**W. Luis Mochán**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

-Uno mas dos mas tres...  
-¿Hasta qué número vas a sumar?  
-...mas cuatro mas cinco. Todos, sin olvidar ninguno. Mas seis mas...  
-¡No se puede!  
-siete mas ocho. ¡Claro que se puede!... ¡Si no me interrumpieras! Mas nueve...  
-Pero esa serie es divergente, no converge, el resultado es infinito.  
-Espérame tantito, me voy a apurar (silencio) ¡Ya está!  
-¿En serio?, ¿cuánto da?  
-Un doceavo, negativo.

Al lector le parecerá absurda esta conversación, pero podría ser una conversación real entre un matemático y un físico. Los físicos hacemos en ocasiones operaciones que podrían considerarse herejías matemáticas. Con frecuencia esas herejías conducen a errores, pero en ocasiones conducen a aciertos que han abierto nuevos campos de estudio en matemáticas. En esta entrega quiero platicarles sobre un problema físico que conduce a sumas tan extrañas como la planteada arriba: el efecto Casimir.

Para empezar, el lector deberá tomar su guitarra. Si no tiene, debe conseguir un amigo guitarrista. Rasgue alguna cuerda al aire (la que desee) con el dedo índice de su mano derecha y escuche. No hay sorpresa. Se oye un tono musical, la nota fundamental de la cuerda. Si Ud. escogió la quinta cuerda, contando de abajo

hacia arriba, habrá escuchado una nota cercana al la, con una frecuencia de 220 oscilaciones por segundo (220 Hz).

Ahora viene la parte difícil. Coloque el dedo índice de su mano izquierda sobre el primer traste de la cuerda y presione. Rasgue de nuevo la cuerda y escuchará un tono ligeramente más agudo por haber acertado la cuerda. A continuación disminuya la presión hasta que su dedo apenas esté en contacto con la cuerda. Al rasgarla, escuchará de nuevo el tono inicial, pero ahora apagado y desagradable. La cuerda intenta vibrar en su tono fundamental, pero el dedo le roba toda la energía y se lo impide.

Repita este experimento pero colocando con suavidad su índice izquierdo sobre el punto medio de la cuerda, justo arriba del doceavo traste. Rasgue. Escuche. Si todo salió bien, debe haber escuchado una nota pura mucho más aguda. En la quinta cuerda sería de 440 Hz. Esta nota seguirá sonando incluso si Ud. retira el índice izquierdo.

Ahora coloque su índice izquierdo sobre uno de los puntos que dividen a la cuerda en tres partes iguales, por ejemplo, sobre el séptimo traste, y repita la operación (ver figura 1). Recuerde, sin presionar. Luego pruebe el quinto traste. Continúe experimentando con otras posiciones. Notará que en algunas posiciones la cuerda generará sonidos muy puros y en otras posiciones sólo un ruido apagado.

Lo que ilustra el ejercicio anterior es que una cuerda al aire puede vibrar de muchas maneras distintas

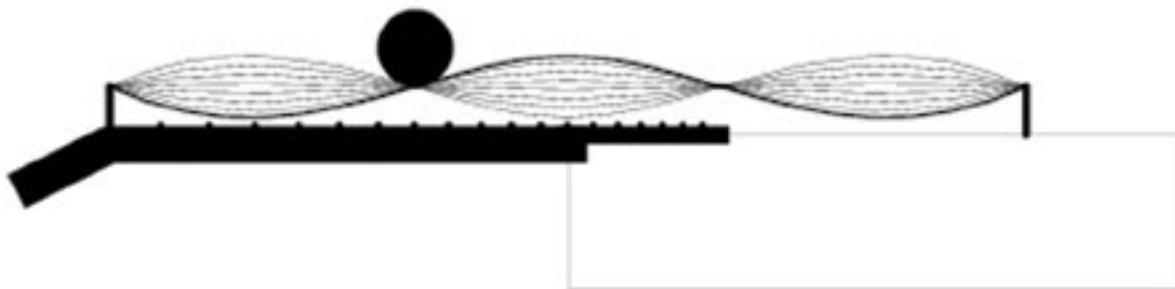
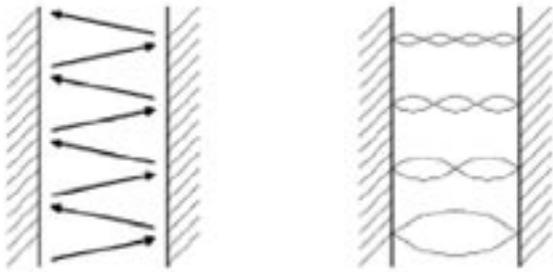


Figura 1: Se muestra una guitarra vista de canto y una cuerda oscilando cuando un dedo es colocado sobre el traste número siete.



*Figura 2: En el lado izquierdo se muestra un rayo de luz atrapado entre dos espejos. De lado derecho se muestra el campo eléctrico asociado a los primeros modos normales de oscilación de la luz atrapada entre dos espejos.*

dando origen a su tono fundamental o a uno de sus muchos armónicos.

Sobre una cuerda tensa se propagan ondas. Estas ondas se reflejan cuando llegan al extremo de la cuerda y se vuelven a reflejar cuando llegan al extremo opuesto. Este ir y venir sólo es posible cuando la onda múltiplemente reflejada es idéntica a la onda inicial, pues de lo contrario, la interferencia destructiva acabaría con la vibración. Esta condición determina la frecuencia del tono fundamental y la de cada uno de los armónicos, que resultan ser múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

Ahora considere dos espejos, uno frente al otro. Si lográramos inyectar luz entre ellos, las ondas luminosas rebotarían entre uno y el otro. De manera análoga a las vibraciones de la cuerda, la luz entre los espejos puede oscilar con una de varias frecuencias, la fundamental y sus armónicas constituidas por múltiplos enteros.

La mecánica cuántica nos enseña que nada está quieto, todo se mueve, todo fluctúa, inclusive el campo electromagnético que conforma la luz. Estas fluctuaciones tienen una energía asociada. En el caso de sistemas que vibran Planck y Einstein descubrieron en los albores del siglo XX que esta energía es proporcional a la frecuencia. Pero la luz entre dos espejos no tiene una sino un número infinito de frecuencias que son múltiplos enteros (1,2,3,...) de cierta frecuencia fundamental. Por lo tanto, la electrodinámica cuántica predice que la energía asociada a las fluctuaciones luminosas en el espacio vacío entre dos espejos, la llamada energía de punto cero, es proporcional a  $1+2+3+\dots$ , i.e., ¡es infinitamente grande! Este es un desastre conocido como la catástrofe ultravioleta.

Pero no nos preocupemos: la física elemental nos muestra que lo importante no es la energía misma, sino

sus cambios cuando modificamos al sistema. Por ello, la energía infinita descrita arriba fue ignorada durante muchos años como una constante, ridículamente grande pero irrelevante.

Fue a mediados del siglo XX cuando Hendrik B. G. Casimir se percató que, así como el tono de una cuerda de guitarra depende de su longitud, las frecuencias del campo electromagnético entre dos espejos dependen de su separación. Por lo tanto, la energía de punto cero ¡no es una constante! La energía depende de la separación entre los espejos. Por lo tanto, para mover los espejos debemos hacer trabajo, i.e., vencer una fuerza. Para calcularla se debe extraer la parte finita de sumas infinitas como las mostradas al principio de esta entrega.

La fuerza de Casimir es una manifestación macroscópica de las leyes fundamentales de la mecánica cuántica. Está presente entre cualesquiera dos superficies, pero es muy pequeña a distancias macroscópicas por lo que tardó muchos años en ser medida con precisión. Durante medio siglo se le consideró una mera curiosidad. Sin embargo, dicha fuerza se vuelve muy grande a distancias nanométricas, por lo que jugará un papel cada vez más importante en esta época de miniaturización y de construcción de micro- y pronto nano-máquinas. Recientemente se ha vuelto un tema importante de investigación con sus propias conferencias internacionales para reunir a los expertos de todo el mundo.

Mediante una colaboración entre investigadores de los Institutos de Ciencias Físicas (Morelos) y de Física (DF) de la UNAM y con estudiantes de licenciatura y postgrado de la Facultad de Ciencias de la UAEM (Morelos) se ha elaborado una nueva teoría que ha permitido cálculos precisos de la fuerza de Casimir entre materiales reales y no sólo entre espejos ideales. Esta teoría toma en cuenta que los espejos reales no reflejan toda la luz que incide sobre ellos, sino absorben una parte. Al hacerlo, excitan vibraciones atómicas y transiciones electrónicas que eventualmente se des-excitan produciendo luz de nueva cuenta. Nuestro resultado principal nos permite calcular la fuerza de Casimir a partir de las propiedades ópticas de los espejos, es decir, de su color. Hemos predicho efectos similares, tales y como una torca de Casimir y una nueva fuerza electrónica de Casimir.

Llenos de optimismo por nuestros éxitos, recientemente generalizamos nuestros resultados a cavidades de distintas formas y... para nuestra decepción, obtuvimos una nueva singularidad asociada a la curvatura, un nuevo infinito, una catástrofe, pero ahora infrarroja en lugar de ultravioleta. Así es la ciencia, llena de sorpresas y retos además de satisfacciones. Ahora tendremos que entender la relación entre la geometría y la nueva singularidad y hallar la forma de domarla y eliminarla.

# El monopolito magnético

**José Fco. Récamier Angelini**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

¿Has visto alguna vez a un monopolito magnético? Seguramente no. Cuando tomas un imán en tus manos, éste tiene tanto un polo norte como un polo sur, si lo partes en dos pedazos, cada uno de éstos se convierte en un imán con dos polos cada uno. No importa cuantas veces dividas al imán, siempre encuentras que el resultado es un par de imanes, este hecho ha sido observado en la naturaleza desde que el hombre inició el estudio del magnetismo y tiene como resultado una ley empírica que nos dice que no existe una carga magnética aislada, esto es, no existe un monopolito magnético. Esta es una de las cuatro leyes de la electrodinámica, que es una de las teorías de la física clásica más completas que ha logrado desarrollar la humanidad. La teoría de la electrodinámica fue desarrollada hacia fines del siglo XIX y nos explica el comportamiento de fenómenos tales como la propagación de la luz, reflexión, refracción, interferencia, propagación de señales desde la Tierra hasta un satélite, el movimiento de partículas cargadas en presencia de campos electromagnéticos, la existencia de la aurora boreal, etc.

La teoría de la electrodinámica nos dice que cuando se tienen cargas eléctricas en movimiento (corrientes eléctricas) se generan campos magnéticos y que al cambiar los campos magnéticos se generan campos eléctricos, esto es, los campos eléctrico y magnético están íntimamente relacionados uno con otro.

Esta simetría de los campos eléctrico y magnético se rompe cuando se considera el hecho de que la fuente para el campo eléctrico es una carga eléctrica fundamental, la del electrón, mientras que no hay tal para el campo magnético. ¿No hay o aún no la hemos encontrado? En caso de existir, una carga magnética daría una mayor simetría a la teoría de la electrodinámica, además, como mostró P. A. M. Dirac, se explicaría uno de los enigmas fundamentales de la física, el de la cuantización de la carga eléctrica. ¿Por qué la carga eléctrica de cualquier objeto es un múltiplo entero de una carga fundamental?

Fue Dirac quien, a finales de la década de los 20's se preguntó que pasaría si existiese una carga magnética aislada, esto es, un monopolito magnético. Dirac encontró que la existencia de un monopolito magnético no se contraponen con la mecánica cuántica siempre y cuando la magnitud de dicha carga satisfaga una cierta condición. Esto no quiere decir que los monopolitos magnéticos deban de existir, sino más bien que la existencia o no existencia de éstos debe ser comprobada por el experimento. Cabe hacer notar que la mecánica cuántica es una teoría que trata de

explicar el comportamiento del mundo microscópico y la precisión con la que puede describir procesos microscópicos es impresionante, sin embargo, existen aún una serie de preguntas fundamentales que no han tenido respuesta en el marco de la mecánica cuántica. Dirac desarrolló una extensión a la mecánica cuántica no relativista de Schroedinger y Heisenberg incorporando efectos relativistas obteniendo una teoría aún más precisa que la anterior. Uno de los logros más conocidos de esta teoría relativista es la predicción de la existencia de la antimateria.

Al resolver la ecuación de Schroedinger para una carga eléctrica que se mueve en presencia de una carga magnética, Dirac encontró que, para poder existir, la magnitud de la carga magnética debería de ser un múltiplo entero de  $hc/2e$  en donde  $h$  es la llamada constante de Plank,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $e$  la carga del electrón. Usando el resultado experimental  $hc/e^2 = 137$  se obtiene, para la carga magnética más pequeña posible una magnitud de  $(137/2)e$  un número mucho mayor que la carga del electrón. La relación entre la magnitud de la carga magnética y la de la carga eléctrica nos dice que, de existir una carga magnética, entonces la carga eléctrica deberá tomar un valor mínimo dado, esto es, nos explica la cuantización de la carga eléctrica.

La importancia de la existencia de un monopolito magnético es pues incuestionable, ahora es necesario buscarlos y encontrar al menos uno de ellos. Desde hace ya muchos años, se han dedicado muchos esfuerzos para localizar a un monopolito magnético. Una posibilidad es utilizar aceleradores de partículas para crear una pareja monopolito-anti monopolito, sin embargo, hasta el momento (2007) no se ha logrado crear a dicha pareja. Una posible razón para esto es el hecho de que, de existir, el monopolito magnético sería un objeto grande, con una masa en reposo tan grande que la energía que puede obtenerse actualmente de los aceleradores de partículas es insuficiente. Otra opción es buscarlos en los rayos cósmicos, esta radiación que proviene del espacio exterior, tiene una energía mucho más grande que la que podemos obtener a partir de cualquier máquina construida por el hombre. Es factible entonces que haya monopolitos magnéticos entre los rayos cósmicos.

Esta posibilidad ha sido explorada por diversos grupos de investigadores. En el año de 1982, Blas Cabrera publicó en el *Physical Review Letters* (una de las revistas con mayor prestigio en física) un artículo en donde reportaba que después de haber efectuado mediciones por más de tres meses, había logrado

identificar el paso de un monopolio magnético a través de su detector. Este reporte indicando la existencia del monopolio magnético no fue el primero, y seguramente tampoco el último. En la misma revista, en el año de 1975, Price y sus colaboradores publicaron un artículo en donde tras analizar las marcas dejadas en una cámara de ionización por rayos cósmicos, encontraron que la única explicación posible era que un monopolio magnético había atravesado la cámara. Es claro que cuando se publica un resultado de esta relevancia, grupos de investigadores del resto del mundo tratan de reproducir el experimento para cerciorarse de que la interpretación del mismo es adecuada. Hasta el momento (2007) no ha sido posible reproducir dichos resultados.

En caso de existir, los monopolos magnéticos deben ser estables ya que las leyes de la electrodinámica nos indican que debe haber conservación de carga, entonces, es posible que los monopolos que viajan en los rayos cósmicos se encuentren atrapados en nuestros alrededores. En 1995 H. Jeon y M. Longo reportaron en *Physical Review Letters* haber analizado más de 331 kilogramos de material entre ellos 112 kilogramos de meteoritos, buscando monopolos magnéticos atrapados. Su resultado fue negativo, no encontraron monopolio alguno.

Más recientemente, M. Huber, B. Cabrera, M. Taber y R. Gardner publicaron un artículo (*Physical Review Letters*, 64, 835 (1990)) en donde reportan que habiendo utilizado un detector más preciso y confiable que el usado para el estudio de 1982, realizaron la búsqueda de monopolos durante 547 días consecutivos y el resultado obtenido fue en esta ocasión negativo, esto los hace proponer que el flujo de monopolos magnéticos que atraviesa la tierra es 2000 veces más pequeño que el estimado en 1982 dando un límite superior de  $7.2 \times 10^{13} \text{ cm}^2/\text{s-sr}$  con un nivel de confianza del 90%.

La búsqueda continúa y aunque los resultados han sido negativos hasta el momento (2007), la ilusión de encontrar un monopolio magnético y de esta manera aclarar uno de los enigmas fundamentales de la naturaleza sigue en pie.



*Dirac, a finales de la década de los 20's se preguntó que pasaría si existiese una carga magnética aislada, esto es, un monopolio magnético.*

# Nanobaterías

**Julia Tagüeña  
J. Antonio del Río**

Centro de Investigación en Energía, UNAM Campus Morelos  
Miembros de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

En estos días se habla mucho de la nanotecnología, la tecnología de estructuras o dispositivos con dimensiones cien mil veces más pequeñas que el grueso de uno de nuestros cabellos. Una pregunta que a todos se nos ocurre es ¿qué podemos esperar de la nanotecnología? Estudios de la percepción social de las ventajas que traerá la nanotecnología, pero no tiene muy claro cuáles serán éstas.

Así, una pregunta más elaborada podría ser ¿qué pasaría si agregamos nanoestructuras a los materiales cotidianos? Por ejemplo, se ha encontrado, que si se agregan nanotubos de carbono al papel común, se obtiene un papel resistente, pero aún más, se construye una batería superdelgada y completamente flexible.

Este tipo de baterías será muy útil porque se puede enrollar o doblar, amoldarse a cualquier forma, como el papel, sin perder su eficiencia. No sólo las aplicaciones de estas baterías son sorprendentes, sino que es muy interesante la forma en que fueron descubiertas. Un grupo de investigadores del Rensselaer Polytechnic Institute, en Nueva York, mientras analizaban la forma de fortalecer las membranas utilizadas en los procesos de diálisis renal encontraron que al unir los nanotubos al papel se podía obtener una batería. Este hecho refuerza lo que la comunidad científica ha enfatizado muchas veces: la ciencia impacta más allá de donde se espera. La nanotecnología es uno de los campos donde se puede dar este tipo de aplicaciones cruzadas y no planeadas, pero con sorprendentes resultados.

La importancia tecnológica de estructuras de dimensiones nanométricas fue avizorada por el físico Richard P. Feynman (1918 – 1988) en la segunda mitad de la década de 1950. Relativo al carbono, fue hasta 1985 cuando un grupo de investigadores de las universidades de Sussex y Rice descubrieron una forma alotrópica con estas dimensiones y catapultaron la búsqueda de nanoestructuras. Una forma alotrópica de un elemento es una estructura molecular diferente, con propiedades físicas y químicas distintas; por ejemplo, el oxígeno que puede presentarse como oxígeno atmosférico  $O_2$  u ozono  $O_3$ , o el mismo carbono que puede ser grafito o diamante. En ese año se encontró que el carbono presenta otra forma molecular como de esfera o tubo, ambas huecas. Estas últimas formas alotrópicas del carbono son llamados fullerenos y tubos de carbono. El tamaño de los fullerenos y los diámetros de los nanotubos son del orden de nanómetros. Podemos fabricar tubos huecos o tubos con otros tubos adentro, los primeros se llaman tubos monocapa y los segundos, que pueden

parecerse a las mangueras con paredes múltiples, tubos multicapas.

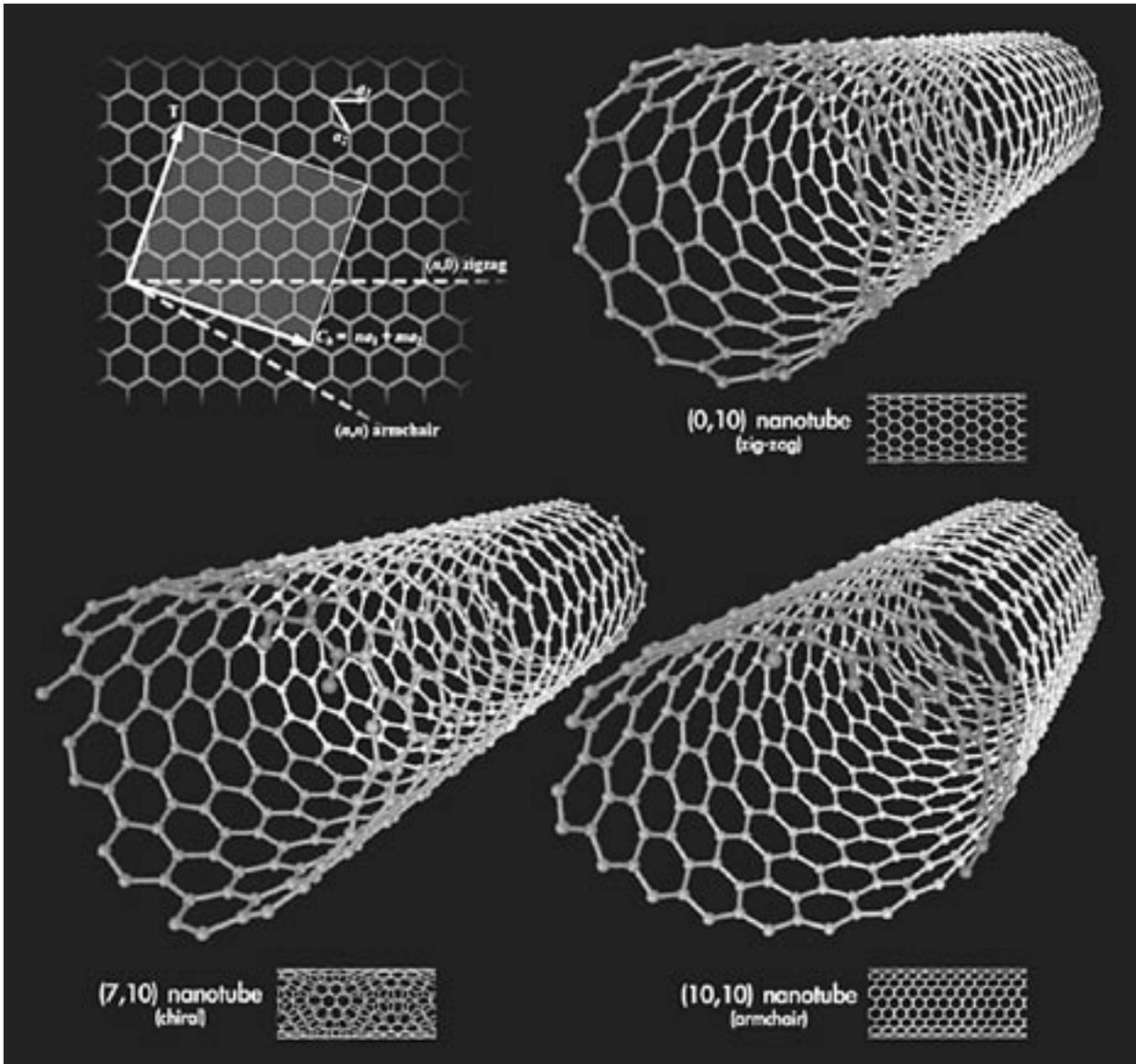
La nueva versión de una batería de papel comprende todos los elementos de una batería normal: electrodos, electrolito y su separador. Para hacer estas baterías se depositan los nanotubos multicapas en un sustrato de silicio usando un método de depósito por evaporación. El depósito se hace para que los nanotubos multicapas queden en forma vertical y formen el primer electrodo. Una capa de papel se sobrepone para separar y dar cierta rigidez a la estructura. Esta rigidez se observa a escala nanométrica, pero no a escala macroscópica, nuestra escala. Posteriormente este papel es impregnado con una capa de una sal orgánica que hará las veces de electrolito. Dado que este líquido iónico no tiene agua, no hay nada en la batería que se congele o se evapore, por esta razón la batería puede operar a temperaturas entre  $-1000C$  y  $1800C$ . Los nanotubos, como se parecen estructuralmente al grafito, le dan un color negro al papel y por lo tanto la batería se vería como un papel negro.

Dado que el papel es biocompatible, estos nuevos nanodispositivos podrían ser usados como fuentes de energía para implantes en el cuerpo que requieran una fuente de energía para funcionar. Existen investigaciones que tratan de sustituir el electrolito por sudor, sangre u orina como agente activador de la batería.

En Morelos, en el Centro de Investigación en Energía, se hace investigación con nanotubos de carbono o fullerenos; ahí se estudia, entre otras muchas aplicaciones, la posibilidad de hacer con ellos celdas fotovoltaicas. Estas celdas fotovoltaicas al recibir la luz del Sol generan electricidad y son uno de los dispositivos para la conversión de la energía solar en electricidad, una forma renovable de obtener energía. Las nanoceldas fotovoltaicas se pueden construir con un fullereno acoplado a un polímero semiconductor y con ellos formar una nanored. En esta unión, cuando es impactada por la luz solar, se desprenden electrones que son conducidos por la red de fullerenos y se produce una corriente eléctrica. Un dispositivo muy sencillo pero que requiere de alta tecnología para ser fabricado de una forma estable.

La posibilidad de unir los dos dispositivos descritos: una nanocelda fotovoltaica y una nanobatería, para que cuando la celda reciba la radiación solar produzca energía eléctrica y ésta sea almacenada por la nanobatería, tiene infinito número de aplicaciones.

En estas pocas líneas hemos ilustrado una de las posibles aplicaciones de los fenómenos que ocurren



*Nanotubo de carbono.*

en la nanoescala y que pronto generarán una gran cantidad de nuevos dispositivos que esperamos ayudarán a hacer nuestra vida más confortable, segura y fácil.

Para concretar todos estos planes se requiere el apoyo financiero para realizar investigación básica y aplicada, y estar listos para las sorpresas, como lo muestra el camino por el que se descubrió a las nanobaterías, hechas de papel y nanotubos de carbono.

Hay más información en <http://www.materialstoday.com/archivo/2007/10-10/news3.htm>

Para mayor información consultar:  
<http://www.cie.unam.mx/~arp/mineria.html> o <http://www.unisci.com/stories/20012/0530011.htm>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Fulereo> y <http://es.wikipedia.org/wiki/Nanotubo>

# De la visión natural a la visión artificial

## Primera parte

**L. Enrique Sucar**

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, INAOE, Puebla  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

“Una imagen dice más que mil palabras” reza un antiguo proverbio chino, lo cual es cierto desde diferentes perspectivas. Por un lado, en muchas ocasiones podemos expresar mucho más a través de un dibujo o fotografía. Por otro lado, nuestro cerebro le da una gran importancia a la información que nos llega a través de la vista, ya que el área del cerebro dedicada a este sentido es la mayor de todos los sentidos.

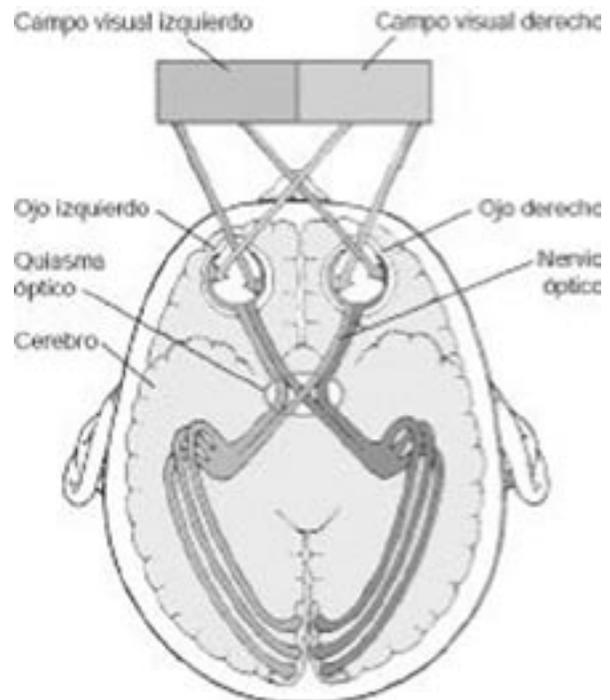
Percibimos las imágenes a través de la retina en nuestros ojos, una especie de cámara fotográfica que responde a la luz que llega a ésta y nos permite ver. Unos minúsculos receptores, llamados conos y bastones, perciben la luz visible (desde el color rojo hasta el violeta). Los bastones son más sensibles a la intensidad lumínica, y nos permiten ver cuando hay muy poca luz. Mientras que los conos perciben el color, algunos son más sensibles al rojo, otros al verde y otros al azul; y mediante la combinación de estos 3 tipos podemos percibir toda la gama de colores. Una vez que esta información es colectada por la retina es enviada al cerebro por una serie de fibras, llamado nervio óptico. Pero, ¿qué sucede después? ¿Cómo es que podemos reconocer los diferentes objetos que percibimos? ¿Cómo sabemos al ver a nuestra madre que es ella y no otra persona? ¿De que forma determinamos la posición en el espacio de un objeto, como un vaso, para poder tomarlo?

Recientemente, mediante experimentos con animales, en particular primates, hemos empezado a adentrarnos al misterio de cómo se procesan e interpretan las imágenes en nuestro cerebro. En base a estos descubrimientos, que iniciaron con las investigaciones de Hubel y Weisel, sabemos que la información que proviene de la retina se divide en dos partes, una va al hemisferio cerebral izquierdo y otro al derecho. ¡Pero no hay una relación única entre un ojo y un hemisferio! Aproximadamente la mitad de la información de un ojo va a un hemisferio y la otra mitad al otro. Esto tiene importantes implicaciones como veremos más adelante.

La información visual se transporta mediante el nervio óptico a la corteza cerebral, a una zona que está en la parte posterior de la cabeza, donde inicia el procesamiento de la información visual en el cerebro. La información es procesada por millones de neuronas que están organizadas en capas; es decir, en grupos de neuronas que realizan ciertas operaciones específicas sobre la información visual que reciben. Podemos pensar que estas neuronas son como pequeñas computadoras especializadas en hacer ciertas

operaciones; hay millones de estas computadoras biológicas que trabajan al mismo tiempo (en paralelo) en la corteza visual.

La primera capa o grupo de neuronas se encarga de detectar “bordes” en las imágenes. Un borde es donde hay un cambio importante de intensidad o iluminación en la imagen, por ejemplo en donde termina un objeto e inicia otro. Otro grupo de neuronas (llamadas células centro-alrededor) detectan pequeños puntos oscuros rodeados de un aro brillante, o viceversa, puntos brillantes rodeados de un aro oscuro. Estos patrones son también indicativos de los contornos de los diferentes objetos en una imagen. Un tercer grupo de neuronas más sofisticadas, detectan bordes pero sólo si estos se encuentran en cierta orientación; es decir, que el borde es como una pequeña línea con cierto ángulo respecto a la horizontal. Así, ciertas neuronas detectan bordes a cero grados, otras a 15 grados, otras más a 30 grados, etc. Otro grupo de neuronas se encargan de detectar movimiento; es decir, pequeños cambios que nos ayudan a detectar objetos que se mueven. Por



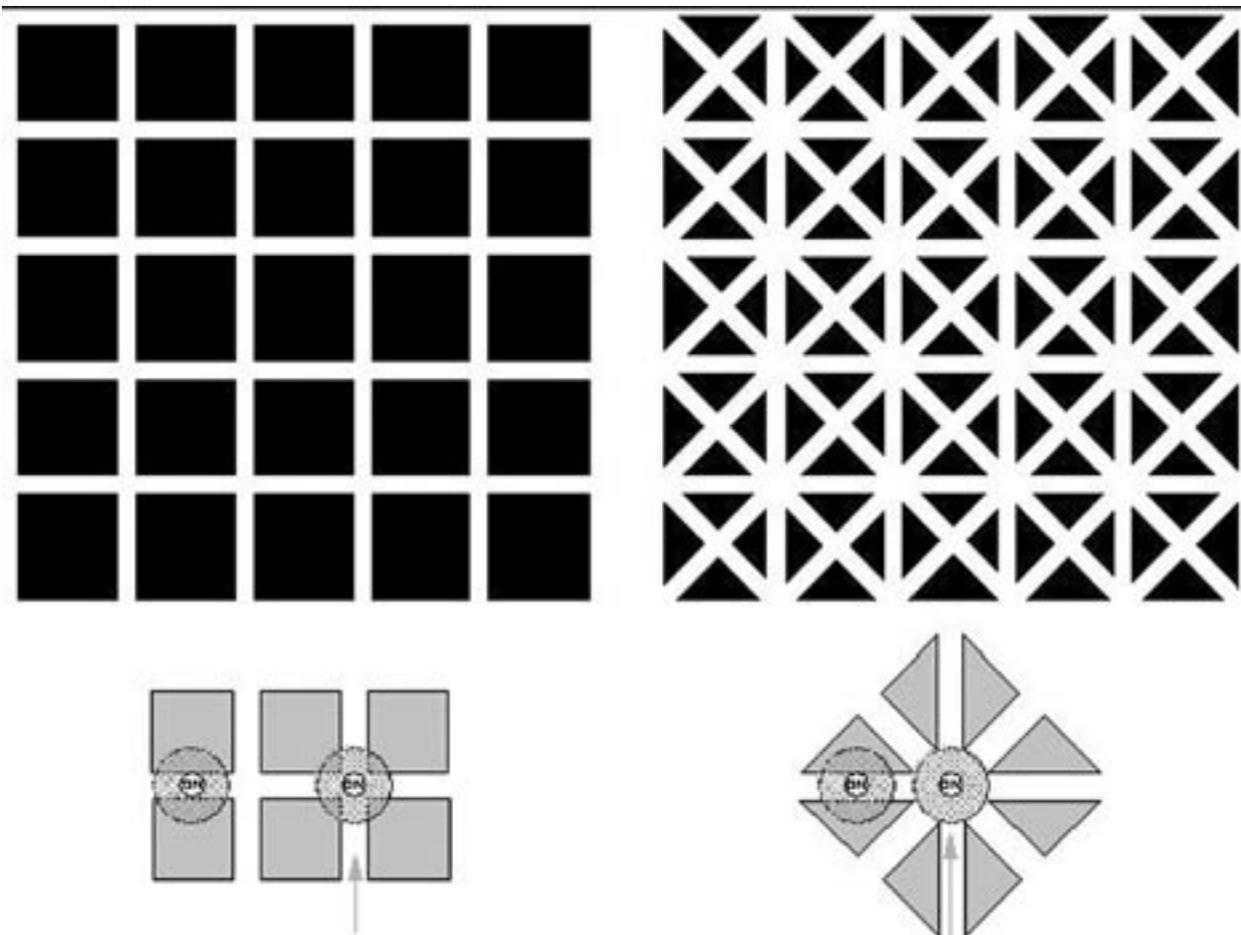
*Trayectorias visuales en el cerebro. Se ilustra cómo la información que percibimos en la retina de ambos ojos viaja mediante el nervio óptico hasta llegar a la corteza visual, donde se procesa la información.*

ello nos percatamos, aunque no estemos atentos, de cuando algo o alguien se aproxima a nosotros, incluso si no lo estamos mirando directamente. También hay neuronas para determinar la profundidad o distancia a los objetos que vemos. Para esto se combina la información de los dos ojos, mediante lo que se conoce como visión estéreo –la distancia a un objeto en nuestro campo visual es inversamente proporcional a su separación en la retina de cada ojo. Lo puedes verificar tu mismo: pon un dedo frente a ti, cercano a tus ojos, cierra uno y después el otro. Verás al dedo en distintas posiciones con cada ojo.

De lo anterior podemos considerar que el cerebro va analizando las imágenes mediante un esquema que va de lo particular a lo general. Se van detectando pequeños elementos como son los bordes y esquinas de los objetos, luego estos se van agrupando para poder detectar los contornos, y de esta forma ir separando o segmentando los diversos objetos presentes en una imagen. Más adelante, en este complejo sistema de procesamiento, se van analizando las características de cada objeto, como su color y su forma, para poder

finalmente reconocerlos y determinar su posición en el espacio. Sin embargo, de lo que sucede más allá de las primeras capas del sistema visual sabemos muy poco aún. ¿Cómo es que finalmente el cerebro reconoce las diferentes clases de objetos –plantas, animales, tazas, sillas, etc.? ¿Cómo podemos distinguir entre un objeto específico de una misma clase; por ejemplo, mi taza preferida de las de demás tazas? Éstos son aún misterios escondidos en la compleja red de neuronas dentro de nuestro cerebro, esperando a ser descubiertos por los científicos del futuro que continúen explorando este maravilloso misterio de la inteligencia humana.

Al mismo tiempo que los biólogos empezaban a entender como es que los seres vivos vemos, otro grupo de científicos e ingenieros, especialistas en computación e inteligencia artificial, comenzaban a explorar la idea de la visión artificial: computadoras que pudieran analizar e interpretar las imágenes como lo hacemos los humanos, naciendo una nueva disciplina de la cual hablaremos en otra ocasión. (Continúa)



*Las celdas centro-alrededor, que detectan pequeñas regiones brillantes rodeadas de regiones oscuras o viceversa, provocan esta ilusión óptica en que vemos que aparecen y desaparecen puntos oscuros en las intersecciones de las líneas blancas.*

# De la visión natural a la visión artificial

## Segunda parte

**L. Enrique Sucar**

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, INAOE, Puebla  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Al surgir las primeras computadoras hace más de 50 años, algunos científicos se preguntaron si esas máquinas podrían realizar tareas que asociamos con la inteligencia humana como resolver problemas, entender el lenguaje o analizar imágenes. Se empezaron entonces a desarrollar programas de computadora que buscaban emular la inteligencia humana, naciendo una nueva disciplina que se conoce como “inteligencia artificial”. En los primeros años se tuvieron avances aparentemente muy rápidos, con programas de computadora que juegan ajedrez, demuestran teoremas matemáticos o diagnostican ciertas enfermedades.

Ante tan impresionantes avances, cuenta la leyenda que un profesor encargó a un estudiante que resolviera el problema de visión en un verano; ¡aún no termina su proyecto! A través del tiempo los investigadores en inteligencia artificial nos hemos percatado de que las capacidades aparentemente fáciles para nosotros, como el ver, entender el lenguaje, planear nuestras actividades, etc., han resultado las más difíciles para las computadoras.

La visión artificial comienza, en forma análoga a la humana, con una imagen que es capturada a través de una cámara y guardada en la memoria de la computadora. Para la computadora la imagen es como un arreglo o matriz de puntos, llamados píxeles. Cada píxel tiene asociados un valor numérico, por ejemplo entre 0 y 255. En el caso de una imagen en blanco y negro, cada punto representa la intensidad o brillantez de la imagen. Las imágenes a color se representan con 3 arreglos de puntos, uno para el rojo, otro para el verde y otro para el azul; su combinación representa los diferentes colores. Una vez que se tienen las imágenes en la computadora, inicia el procesamiento de las mismas mediante programas de *software*, para intentar analizarlas y reconocer los objetos presentes en la imagen.

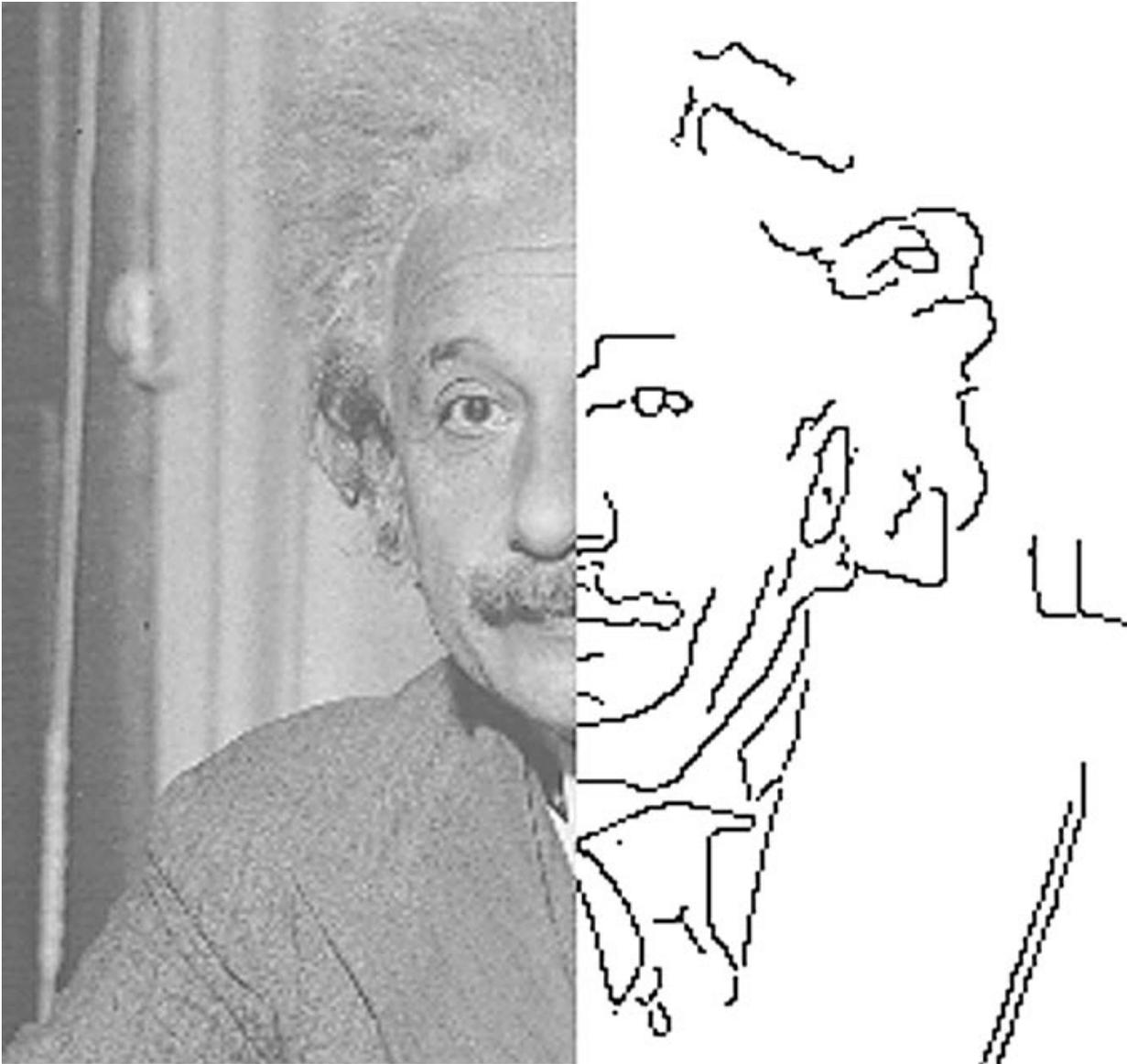
El análisis se va realizando por etapas, de cierto modo en forma similar a la visión biológica. Mediante la estimación de las diferencias entre píxeles vecinos en la imagen, se obtienen los llamados bordes que indican donde termina un objeto y empieza otro. De esta forma se pueden delimitar los contornos de los diferentes objetos, o sus partes, en la imagen. También se puede hacer esto uniendo píxeles que tienen características similares en color o intensidad. Una vez separadas estas regiones, lo que se conoce como segmentación, se obtienen características distintivas de las mismas, como su color, su forma o su textura.

La textura se refiere a propiedades estadísticas de los objetos que los hacen no uniformes, como una alfombra, la madera o un bosque visto desde lejos. Con base en dichas características se pueden distinguir algunos objetos o zonas de la imagen como el cielo, una mesa, o un tigre. Sin embargo, en general es muy difícil poder distinguir algunos objetos, ya sea porque varían en su apariencia visual (como las diversas clases de flores) o porque se ven distintos desde diferentes puntos de vista (como una persona vista de frente, de perfil o por atrás) o porque son muy complejos y están a su vez formados por otros objetos (como una cara humana). Por ello, los sistemas de visión actuales se enfocan a reconocer un pequeño grupo de objetos, como puede ser el reconocer automóviles, partes industriales o personas. Pero no se ha podido desarrollar un sistema que tenga la capacidad de reconocer muchos objetos, con propiedades muy diferentes, como lo hacemos las personas.

Otro aspecto en el cual ha tenido avances significativos la visión artificial es en recuperar la tercera dimensión a partir de imágenes. Una imagen tiene sólo 2 dimensiones, ¡pero el mundo es tridimensional! Si queremos que un robot pueda tomar un objeto, o estimar la distancia a la pared para no chocar con ella, requerimos estimar la tercera dimensión. Existen varias estrategias para hacer esto. La más directa, en forma análoga a nosotros, es utilizar dos cámaras, en lo que se conoce como visión estereoscópica. Para ello la computadora analiza las



*Esta imagen ilustra el proceso de segmentación de imágenes en la computadora. Podemos observar cómo se han separado el cielo, la piscina, y algunas partes de la casa (señalados con líneas blancas).*



*Esta fotografía de Einstein muestra el proceso de detección de bordes en una imagen. Del lado izquierdo vemos la imagen original, del lado derecho los contornos obtenidos mediante la detección de bordes por la computadora.*

imágenes obtenidas por dos cámaras, separadas cierta distancia. Al encontrar los puntos correspondientes entre una imagen y la otra, y medir su diferencia en posición (disparidad), se puede calcular la distancia a dicho punto en el mundo mediante relaciones geométricas. Sin embargo, determinar los puntos correspondientes entre el par de imágenes no es una tarea fácil. Otras estrategias para recuperar la profundidad se basan en los cambios de luminosidad debidos a la forma del objeto (forma de sombreado), a las distorsiones de las texturas por su orientación (forma de textura), o en usar video; es decir, varias imágenes consecutivas moviendo la cámara o el objeto (forma de movimiento).

Los avances en la visión artificial han permitido desarrollar diversas aplicaciones prácticas de sistemas de visión por computadora. Por ejemplo, hay sistemas en plantas industriales que ayudan a detectar defectos

de fabricación en ciertas partes o productos. También hay aplicaciones en medicina, con sistemas que ayudan a los médicos a analizar imágenes de rayos-X o tomografías para encontrar tumores, por ejemplo. Se ha utilizado la visión artificial en robots lo que les permite no chocar con las paredes y localizarse en un mapa del entorno. También existen programas de visión que pueden distinguir huellas o caras de personas para identificarlas en sistemas de seguridad.

A pesar de estos avances aún estamos lejos de un sistema de visión artificial que tenga las capacidades de la visión natural humana, en cuanto a su generalidad y flexibilidad. Posiblemente el llegar a comprender mejor cómo es que funciona el sistema visual en nuestro cerebro, nos ayude a desarrollar computadoras y robots con mejores capacidades visuales, ¡y nuestro legendario amigo pueda concluir su proyecto de verano!

# Una breve descripción del trabajo de un físico teórico

**Mariano López de Haro**

Centro de Investigación en Energía, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

En más de una ocasión, al asistir a alguna reunión de tipo social, me he visto confrontado con la siguiente pregunta: “Y usted, ¿a qué se dedica?” Cuando respondo que soy un físico teórico, las reacciones son de lo más diverso y en general me dan a entender que, salvo los que de alguna u otra manera trabajan en ramas de la ciencia o la tecnología y tienen una cierta idea de lo que hacemos, para los demás nuestra labor resulta bastante esotérica y prácticamente ajena a los intereses mayoritarios. En un plano anecdótico y porque en su ingenuidad muestra una faceta de la percepción que la sociedad puede tener de nosotros, quiero referirme a la respuesta que hace algún tiempo hizo la hija (entonces con ocho años) de quien fue mi supervisor de tesis doctoral respecto al trabajo

de su padre. La niña simplemente dijo que él se la pasaba todo el día sentado en su escritorio haciendo pequeñas sumas con su calculadora electrónica. Pero, ¿cómo trabaja en realidad un físico teórico? Algunas otras percepciones pueden quedar esquematizadas en los siguientes dos casos [el primero semi-inventado y el segundo traducido del que aparece en el libro *A random walk in science*. An anthology compiled by R. L. Weber, E. Mendoza, ed. (Institute of Physics, Londres, 1973)]:

Pongamos, por ejemplo, que a un físico teórico se le pide investigar cómo incrementar la producción lechera de una vaca. En primera aproximación, su respuesta sería: “Supongamos que la vaca es esférica...”

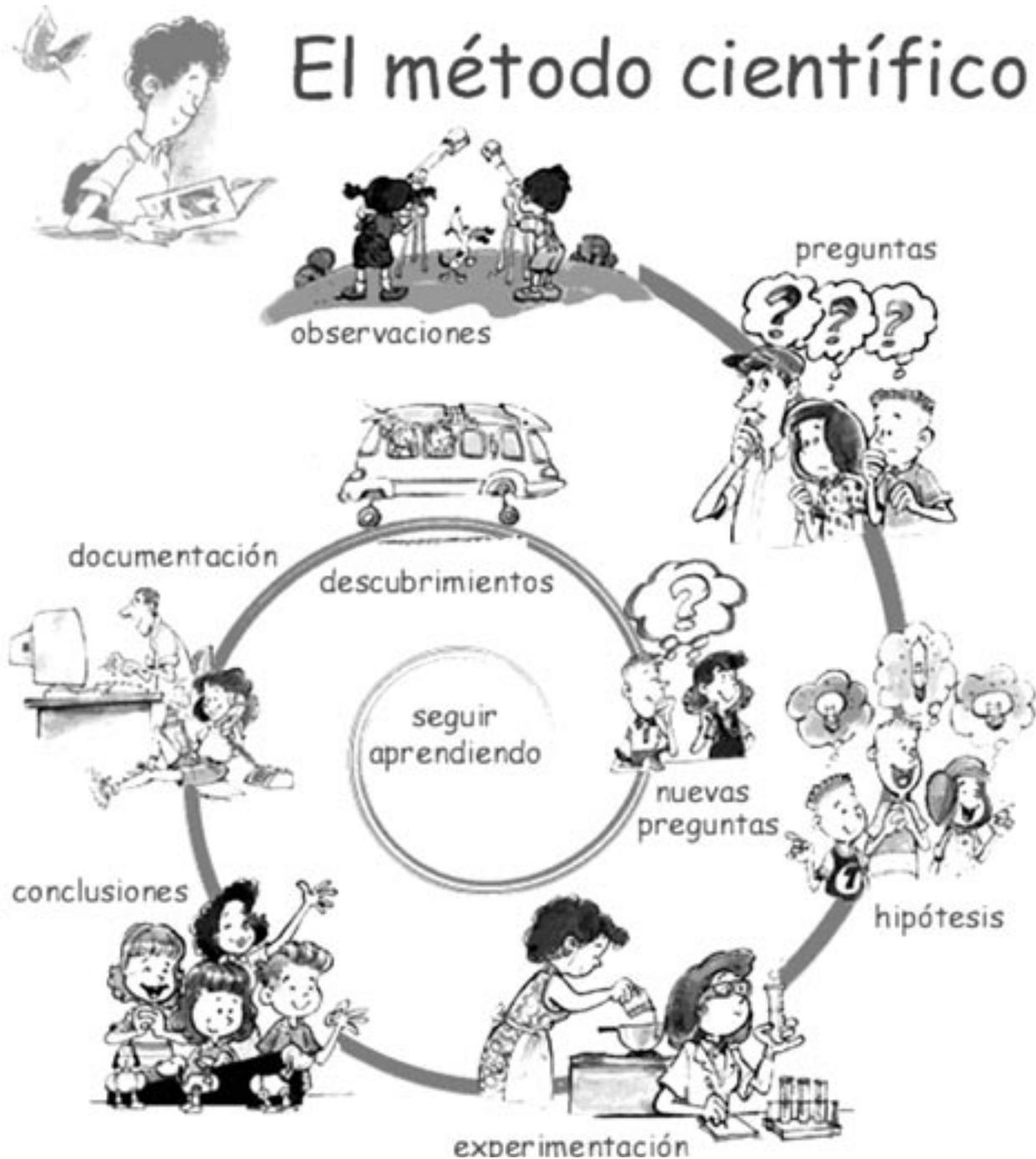
“Cuando se le pide a un físico teórico que calcule, digamos, la estabilidad de una mesa ordinaria de cuatro patas, muy rápidamente es capaz de llegar a resultados preliminares que corresponden a una mesa de una pata o a una mesa con un número infinito de patas. Pasará el resto de su vida tratando infructuosamente de resolver el problema ordinario de una mesa con un número finito arbitrario (diferente de uno) de patas”

Ciertamente, las exposiciones anteriores son sólo una caricatura (y no muy favorable) de lo que realmente hacemos. Con estos antecedentes y aprovechando el foro que nos brinda “La Unión de Morelos”, en esta entrega me propongo proporcionar una visión que espero contribuya a una mejor comprensión de nuestras actividades.

Comencemos con la palabra teoría, aclarando que, aunque tal vez con matices, lo que sigue no solamente se aplica a la Física. Las teorías se desarrollan como respuestas a preguntas del tipo ¿por qué? o ¿cómo? Siendo en principio la Física una ciencia experimental, el origen de cualquier teoría lo podemos situar en la observación, dentro de un fenómeno o de alguna secuencia de fenómenos similares, de cierta regularidad en torno al comportamiento de dos o más atributos (variables) del sistema bajo estudio. Entonces uno se pregunta por qué esto es así. Una teoría intenta explicar los hechos y consiste básicamente en:

- Un conjunto de definiciones que claramente describen las variables que se van a utilizar y un conjunto de supuestos que delimitan las condiciones bajo las cuales se va a aplicar la teoría, con lo que se determina el sistema físico a estudiar
- Una o más hipótesis sobre el comportamiento de estas variables





- Predicciones que se deducen de los supuestos de la teoría, y que se pueden contrastar con datos efectivos obtenidos de observaciones o experimentos.

Una de las principales consecuencias de las teorías es que nos sirven para predecir hechos que todavía no han sucedido. De esta forma podemos comprobar si una teoría es correcta o no, haciendo nuevos experimentos y observaciones cuyos resultados pueden no sólo demostrar que la teoría es válida, sino también sugerir dónde se equivoca, y en su caso proporcionar elementos para corregir la teoría original

o para desarrollar una nueva teoría totalmente distinta.

Cabe aquí preguntarse acerca de cuáles son los criterios necesarios para convencer a alguien de que una teoría dada es correcta. De hecho, puede haber más de una explicación científica sobre una cuestión. Supongamos que en un período de la historia se haya aceptado una teoría sobre la naturaleza que proporciona una explicación adecuada de la mayor parte de la fenomenología conocida pero que tiene algunos defectos en ciertas situaciones. En estas condiciones debe proponerse una nueva teoría,

en cierto modo para subsanar estos defectos, pero teniendo en cuenta ciertas recomendaciones.

A veces la nueva teoría puede ser una generalización de otra u otras y en este caso es un requisito indispensable que debe conducir a los mismos resultados obtenidos con las teorías aceptadas previamente en todos los casos que se ha probado que las teorías anteriores son útiles. Además, la nueva teoría debe explicar hechos que no hayan sido abarcados por teorías previamente aceptadas o que hayan sido predichos de forma incorrecta. Adicionalmente, deben poderse obtener consecuencias de la nueva teoría que difieran de las demás teorías similares, y estas consecuencias deben prestarse a comprobación experimental inequívoca. Finalmente y en aras de la estética, una nueva teoría debe en la medida de lo posible inclinarse por un enunciado universal de sus principios que sea breve y de gran contenido.

En el contexto del trabajo teórico y nuevamente no restringido sólo al ámbito de la Física, hay otra pregunta importante que ha sido motivo de reflexión para los filósofos de la ciencia. La cuestión es cómo discriminar entre una hipótesis o resultado científicos y otros que fuesen más bien una especulación filosófica o metafísica o pseudociencia. La solución racional la aportó Karl Popper (1902-1997) para quien un enunciado será científico en la medida en que más se arriesgue o se exponga a una confrontación que evidencie su falsedad. De acuerdo con esta visión, que yo comparto, se puede decir que la ciencia es simplemente un asunto de tener ideas y ponerlas a prueba, una y otra vez, intentando siempre demostrar que las ideas están equivocadas, para así aprender de nuestros errores.

Ya he mencionado que la Física es una ciencia experimental. Debe enfatizarse ahora que la elección no es entre teoría y observaciones, sino entre mejores o peores teorías para explicar las observaciones; los hechos son intocables. De hecho ambos aspectos son complementarios y para un físico teórico los

experimentos actúan como elementos cruciales que permiten decidir entre las varias posibles interpretaciones teóricas. Veamos ahora de manera esquemática cómo se ubica el trabajo de un físico teórico dentro del planteamiento que usualmente se emplea en la enseñanza secundaria para describir el llamado método científico, que en la práctica puede resultar bastante más complicado de lo que aquí presentamos. En esta descripción se recurre a la siguiente secuencia: 1. Plantear un problema; 2. Observar algo; 3. Buscar una teoría que lo explique; 4. Hacer predicciones usando esa teoría; 5. Comprobar esas predicciones haciendo experimentos u observaciones; y 6. Si los resultados están de acuerdo con la teoría, volver al paso cuatro, si no, volver al tercero.

El trabajo puramente teórico puede contribuir tanto al planteamiento del problema como al desarrollo de la teoría correspondiente. Más aún, como actualmente hay “experimentos” que se pueden hacer en una computadora, en estos casos el físico teórico interviene en todas las etapas anteriores. Antiguamente las herramientas de trabajo que un físico teórico utilizaba se restringían a libros y artículos científicos y a desarrollos matemáticos realizados con lápiz (o pluma) y papel. En la actualidad, a estos elementos se han añadido las computadoras y las bases de datos electrónicas, con lo que el trabajo manual se ha visto grandemente simplificado. En cuanto a las teorías resultantes, los canales usuales de comunicación son la publicación de artículos en revistas, la escritura de libros, la presentación en congresos especializados y las pláticas y conferencias de divulgación.

Para finalizar quiero señalar un aspecto que todavía no he tocado y que se refiere al reto intelectual de poder comprender cómo y por qué ocurren los fenómenos naturales y al goce interior que se obtiene cuando uno lo ha logrado o cree haberlo logrado. Podría hacer comparaciones con otras sensaciones placenteras pero dejo al lector la invitación a descubrirlo por sí mismo.



# ¿Es simple el agua simple?

## Primera parte

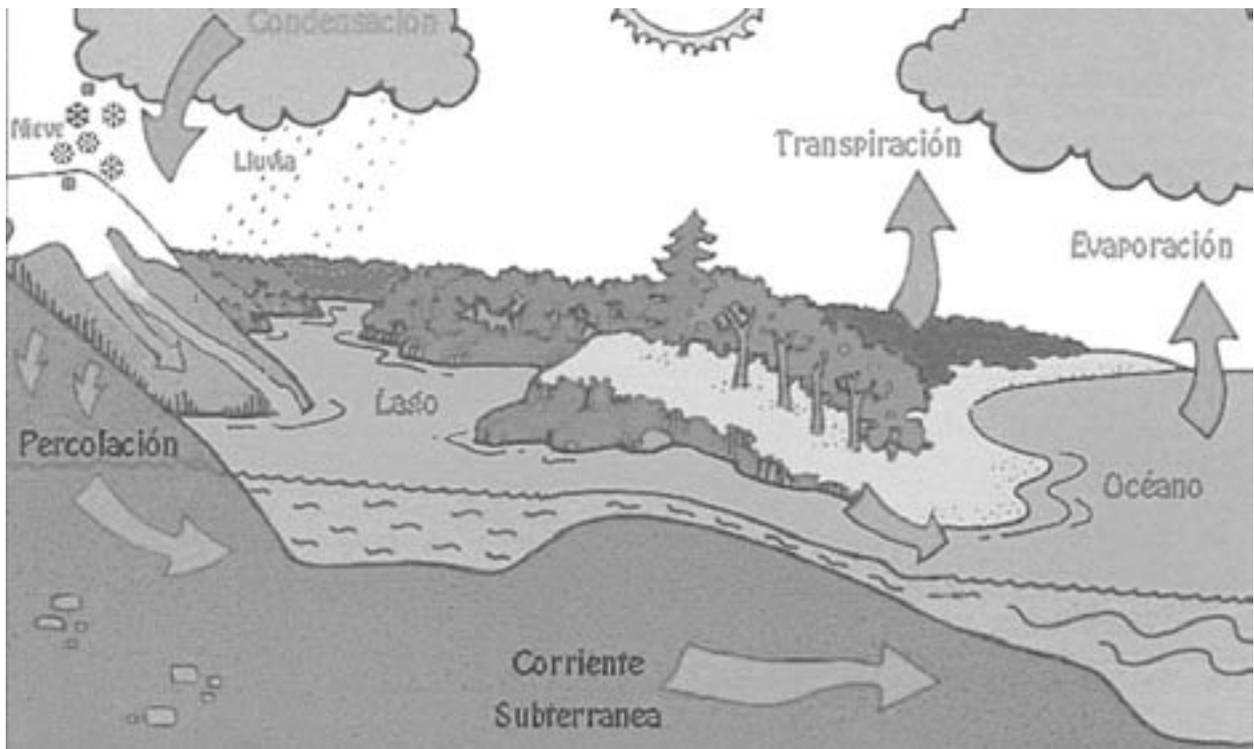
**Humberto Saint-Martin Posada**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

¿Cuándo aparece la vocación científica? Me parece que cuando se descubre que una “evidente verdad” no lo es, cuando se despierta una rebeldía a aceptar repetir lo que “todo el mundo sabe”, y se decide poner en duda los “conocimientos establecidos”. De hace ya cuatro décadas, de mis lecciones en la primaria “Próceres de la Independencia” basadas en los libros de texto gratuitos sobre Ciencias Naturales recuerdo dos de esas verdades que estaban en franca contradicción con mi experiencia cotidiana: una era que el agua era de color “blanco” y la otra que los limones eran de color “amarillo limón”. Luego de una discusión con mi maestra, ella aceptó que el agua era “incolora”; en cuanto a los limones, me sorprendió el enterarme que además del fruto que yo consumía en casa, de evidente color verde, existía otro fruto, que en México llamamos “limón real” o “limón europeo”, que nunca había visto, pero que sí tenía ese color amarillo al que le da su nombre. Pasaron muchos años antes de que yo tuviera en mis manos uno de esos limones reales.

En cuanto al agua, mi fascinación por ella creció al estudiar el “ciclo natural del agua” que, como

todos los que hayan estudiado la primaria saben, comprende los estados sólido, líquido y gaseoso; es más, en la propia casa se tiene experiencia de esos estados de equilibrio, e incluso de las transiciones entre ellos: por ejemplo, cuando nos duchamos con agua caliente notamos la formación de una neblina en el cuarto de baño, que es el vapor de agua; además esta neblina se “pega” a los espejos, dejando una capa delgada que bien puede evaporarse de nuevo, o bien dar lugar a la condensación, la agregación para formar gotas que resbalan por la superficie del espejo. En otra zona importante de la casa, en la cocina, dentro del congelador, ocurre el proceso de solidificación del agua, la formación del hielo, que se vuelve casi indispensable en las bebidas durante la época de calor. Estos fenómenos tan cotidianos, casi vulgares, no parecerían dignos de captar la atención de nadie; sin embargo, un momento de reflexión nos puede llevar a cambiar de opinión al preguntarnos si conocemos alguna otra sustancia que se pueda observar cotidianamente en los tres estados de agregación. Quizás algún trabajador de una fundición o algún herrero pueda decir otra cosa, pero para la



mayoría de la gente la respuesta es negativa; así de especial es el agua. Tanto que durante mucho tiempo se consideró que el hielo, el agua y el vapor eran sustancias distintas. Aún ahora usamos esas palabras, en vez de referirnos a ellas como el sólido, el líquido y el gas de agua.

Cuando yo era ya un poco mayor mi grupo de primaria fue invitado a la secundaria federal No. 91, de la cual luego yo sería alumno. En esa ocasión el maestro de física nos había preparado un experimento para mostrarnos cómo aumentaba el volumen del líquido al aumentar la temperatura. Es decir, la misma masa de agua ocupa más espacio a mayor temperatura; o sea que su densidad se hace menor, por lo cual el agua más caliente “flota” sobre el agua más fría. Este comportamiento es común a todas las sustancias, por ejemplo el aire: un globo aerostático se eleva por tener en su interior aire más caliente que el del exterior. Hasta aquí, todo parece ser de nuevo cotidiano, simple y hasta aburrido... Pero ¿acaso el hielo no está hecho de agua y se encuentra a menor temperatura que el líquido? El problema con esta pregunta es que ¡el hielo flota en el agua! Y esto nos lleva a otra pregunta ¿existe alguna otra sustancia cuyo sólido flote en su propio líquido? Aunque la respuesta es positiva, el número de materiales con esta característica es

muy reducido; así que el agua volvía a mostrarme un comportamiento muy peculiar, que de nuevo llamó mi atención. ¡Vaya!, esa peculiaridad es de gran importancia para los organismos acuáticos en lugares con inviernos fríos: si el hielo no flotara, toda el agua de un estanque o de un lago acabaría congelándose; en cambio, la capa de hielo flotante aísla al líquido del aire frío y ayuda a mantener una temperatura cercana a 4°C, suficientemente alta para que los organismos acuáticos permanezcan vivos.

Quiero terminar esta primera contribución al diario diciendo que luego de cuarenta años de esa primera fascinación que me ocasionó la sustancia agua, sigo estudiando el tema de sus estados de agregación, que no deja de asombrarme, sino que incrementa mi interés por entenderlos. También me parece que vale la pena señalar que las peculiaridades del agua han estimulado la imaginación de muchas otras personas; a tal grado que varias de las conclusiones a las que han llegado son falsas, por ejemplo la de que el agua conserve una cierta “memoria”, bien de las sustancias que tuvo disueltas, o incluso de los estímulos sonoros y hasta escritos a los que se le haya sujetado. Abundaré sobre estas falsas conclusiones en una siguiente contribución.

# ¿Es simple el agua simple?

## Segunda parte

**Humberto Saint-Martin Posada**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

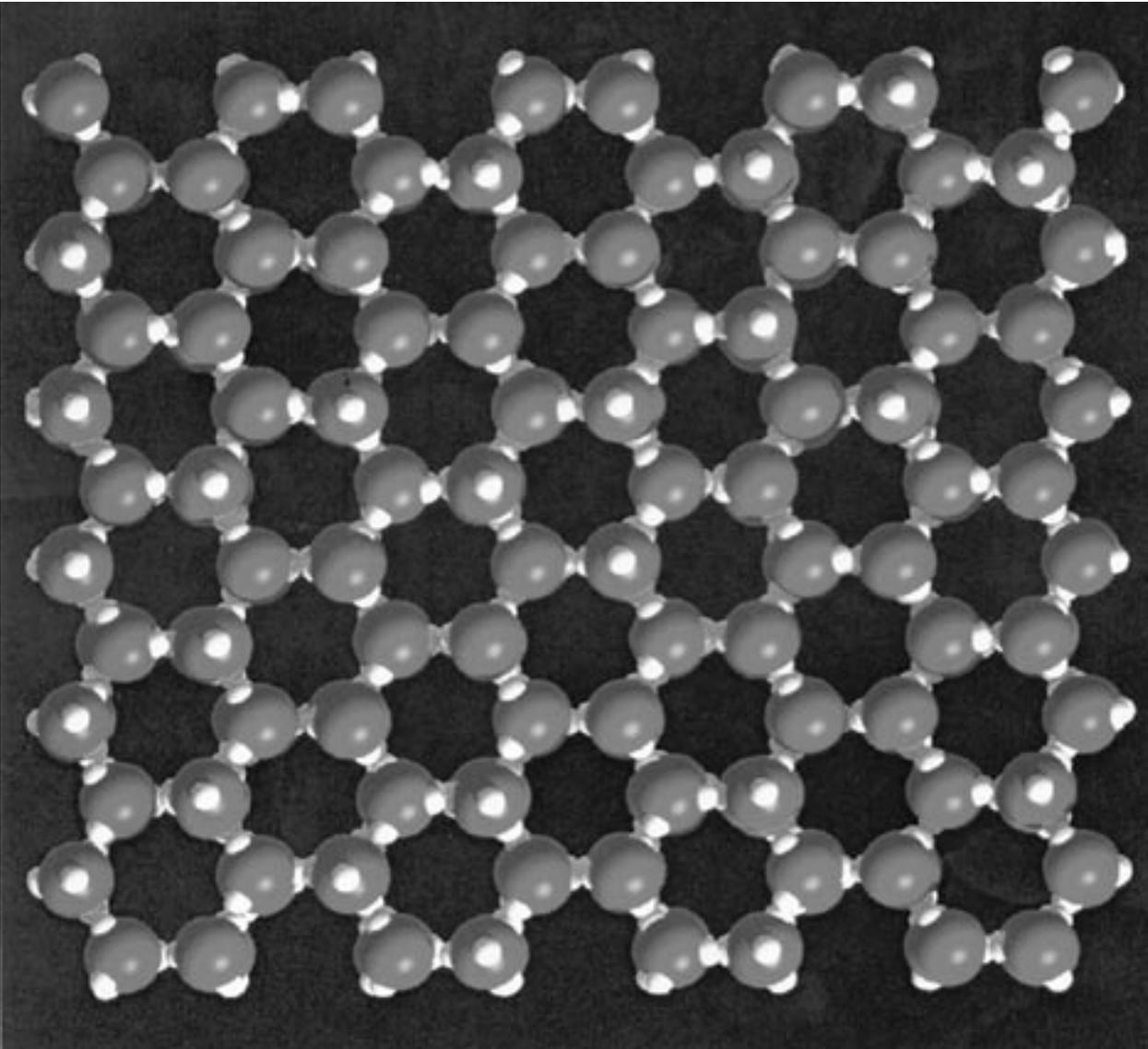
Al final de mi primera contribución en “La Unión de Morelos” prometí escribir sobre la falsedad de la creencia de que el agua puede “recordar” las sustancias que alguna vez estuvieron disueltas en ella, los estímulos sonoros a los que se le haya sometido o incluso los letreros que se hubieran puesto al recipiente que la contuviera. Para poder establecer mis argumentos con mayor claridad, primero me parece necesario abundar acerca de algunos de los comportamientos peculiares que sí presenta el agua; en esta ocasión usando como ejemplo al hielo: cuando a mis once años tuve la oportunidad de hacer un viaje a la Unión Americana, al estado de Colorado, visité las Montañas Rocallosas y por segunda vez en mi vida tuve contacto con la nieve. La primera vez fue durante un frío invierno en que nevó en la Ciudad de México, me parece que en 1965 ó 1966. Como lo referí de otras ocasiones, el comportamiento del agua capturó mi atención: como todos sabemos, la nieve no es otra cosa que hielo... Pero no es un hielo igual a los cubitos que sacamos del congelador; no sólo se trata de que esté pulverizado, sino de que tiene características de agregación y de movimiento (reología) distintas a las de la arena que se obtenga de pulverizar una piedra. Aunque entonces yo no lo sabía, resulta que hay doce (sí, 12) variedades cristalinas de hielo de agua, y una más que se denomina amorfa. Más aún, ahora se han descubierto los nanohielos, que se forman cuando una cantidad de moléculas de agua se confina en un espacio estrecho, por ejemplo en cilindros cuyos radios miden unos cuantos nanómetros (un nm es la millonésima parte de un milímetro). Y aquí ya estoy utilizando el término molécula, dando una idea de su tamaño; aunque existen moléculas mucho mayores, como las proteínas, por ahora no me referiré a ellas. Conviene mejor referirme a la visión molecular de la materia, que nos permite explicar los fenómenos macroscópicos de las sustancias en términos de las moléculas que las constituyen, y de las interacciones entre ellas; para enfatizar la importancia de esta visión, incluso de referirla a los átomos que forman a las moléculas, transcribo a continuación un texto de Richard P. Feynman, uno de los físicos más importantes de la segunda mitad del siglo XX (*The Feynman Lectures on Physics*, Fondo Educativo Interamericano, S. A., 1971):

“Si en algún cataclismo fuera destruido todo el conocimiento científico y solamente pasara una frase a la generación siguiente de criaturas, ¿cuál enunciado contendría el máximo de información en el mínimo

de palabras? Yo creo que es la hipótesis atómica (o el hecho atómico, o como quieran llamarlo), que todas las cosas están formadas por átomos -pequeñas partículas que se mueven con movimiento perpetuo, atrayéndose unas a otras cuando están separadas por una pequeña distancia, pero repeliéndose cuando se las trata de apretar una contra otra.”

Entiendo que basándose en los datos disponibles sobre la expansión del universo, las teorías actuales de los cosmólogos ponen a prueba esta hipótesis atómica, pues proponen la existencia de una cosa que probablemente no esté formada por átomos: la materia oscura; pero la hipótesis atómica sigue siendo válida para explicar los fenómenos químicos que se han logrado caracterizar por métodos experimentales en nuestro planeta, incluyendo por supuesto a los del agua. La imagen que acompaña a este texto es una representación gráfica del arreglo que tienen las moléculas de agua en el hielo común; cada molécula está conformada por un átomo de oxígeno (círculos oscuros grandes) y dos de hidrógeno (círculos chicos), y cuenta con cuatro moléculas vecinas en los vértices de un tetraedro centrado en ella. La proyección lateral muestra un arreglo hexagonal, por lo que el hielo común se denomina hielo Ih. Como dato adicional, cabe mencionar que oxígeno significa “generador de ácidos”, e hidrógeno significa “generador de agua”; estas denominaciones provienen de la creencia inicial de que todos los ácidos contenían oxígeno, aunque ahora sabemos que no es así, sino que contienen hidrógeno. Quizás los nombres deberían haberse cambiado; pero eso hubiera llevado a posibles confusiones, así que la comunidad científica optó por conservar esta nomenclatura.

La escala molecular es tan pequeña que es imposible usar luz visible para detectar moléculas aisladas, aún grupos de algunas cuantas moléculas. De hecho, con este argumento estoy negando la afirmación que hace un Sr. Masaru Emoto con respecto a que las imágenes que presenta por ejemplo en la película de 2005 titulada *¿Y tú qué @#v!\** Sabes?, sean de moléculas de agua. En realidad se trata de ampliaciones de trozos macroscópicos de hielo o, en el mejor de los casos de copos de nieve, que si bien son microscópicos, tienen un tamaño varios miles de veces mayor al de las moléculas. Más todavía, en una siguiente contribución a “La Unión de Morelos” intentaré explicar por qué son falsas las afirmaciones del Sr. Emoto con respecto a que el agua pueda percibir los sentimientos humanos; para ello intentaré



*Representación gráfica del arreglo que tienen las moléculas de agua en el hielo común.*

mostrar a los lectores que los resultados que él presenta como legítimos carecen de validez científica. Comprendo que en este intento debo afrontar el difícil problema de proveer una buena definición de lo que es la validez científica, en especial cuando en mi primera contribución exalté como una virtud el dudar del conocimiento establecido, y que en el párrafo inmediato anterior me atrevo a mencionar a la materia oscura. La pregunta es, pues, ¿cómo distinguir una afirmación cierta de una falsa, al menos desde el punto de vista científico? El asunto es tanto más delicado

cuanto que una opinión muy extendida acerca de los científicos es que somos “cerrados” a aceptar nuevas ideas, a siquiera considerar legítimas “otras formas de pensar”. Así, para responder a la pregunta sobre el criterio de verdad que usamos los científicos, necesitare el espacio que me permita usar el periódico en una siguiente contribución. Ésta la terminaré mencionando que los científicos no detentamos la exclusividad del escepticismo; lo compartimos con al menos otro gremio, el de los magos profesionales, los ilusionistas.

# Explorando la complejidad sin complejos Primera parte

**Gustavo Martínez Mekler**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

No me sorprendería que tras una ojeada de esta edición de "La Unión de Morelos" nos topemos con las palabras caos, crisis o complejidad [1]. Vivimos tiempos en que estos calificativos son tan cotidianos que aparecen reiteradamente en los periódicos. En 1977 la obra póstuma de un visionario, el embriólogo, geólogo y filósofo inglés Conrad Waddington, "Las Herramientas del Pensamiento" [2], da inicio con el siguiente texto: "... hoy las cosas van mal tantas veces y en contextos tan diferentes, que mucha gente comienza a sentir que su modo de pensar sobre el funcionamiento del mundo es el que debe estar errado. Creo que esta sospecha probablemente tiene sustento. Los modos como se conciben las cosas, que han sido aceptados en el pasado y que se han vuelto sentido común, en realidad no funcionan en todas las circunstancias y muy probablemente hemos llegado a un periodo de la historia en que este buen sentido no corresponde a los procesos que ocurren en el mundo en general... Hoy debemos ser capaces de pensar

no solamente en sistemas simples, sino en sistemas complejos". La vigencia de este texto es evidente.

Aunque a la fecha (2008) no se tiene una definición universalmente aceptada de qué son los sistemas complejos, estos son fácilmente identificables, por ejemplo la turbulencia, los huracanes, los sismos, una célula, el sistema nervioso, el inmunológico, el desarrollo urbano, el sistema de salud, el de seguridad pública, la evolución de ecosistemas, el estudio de mercados, de la bolsa de valores, la mente, la conciencia y el lenguaje, en fin, la lista es larga. Puestos a caracterizarlos notamos que se trata de sistemas que involucran a muchos componentes o procesos interdependientes, con comportamientos que podríamos asociar a interacciones no lineales (aquellas para las cuales los efectos no son proporcionales a las causas). Bajo estas condiciones el sistema en su conjunto presenta propiedades que emergen de la colectividad, estas propiedades a su vez se interrelacionan en formas no triviales, de nuevo en



general no lineales. Consideremos, como ejemplo, un linchamiento perpetrado por una turba enardecida. En general los partícipes del suceso no tenían la intención de un linchamiento antes del suceso y se cuestionan sus actos después. Esa intención es una propiedad emergente.

Sucede además que en estos sistemas no es necesario ni suficiente el conocimiento detallado del comportamiento de los componentes. En palabras de Murray Gell-Mann, premio Nobel de física por sus trabajos sobre los componentes de las partículas subatómicas: “Una de las características más importantes de los sistemas complejos no lineales es que no pueden, en general, ser analizados exitosamente con la determinación previa de un conjunto de propiedades o aspectos estudiados separadamente, para luego combinar estos tratamientos parciales en un intento de formar una imagen del todo. Es necesario ver al sistema en su totalidad, aún cuando ello signifique tomar una visión cruda, y luego permitir que posibles simplificaciones emerjan del trabajo.”[2] Esta característica confiere a los sistemas complejos un grado de universalidad, en el sentido que conforman familias que exhiben el mismo comportamiento colectivo. Propiedades de esta naturaleza fomentan el desarrollo de un pensamiento analógico que ayuda a tender puentes entre variedad de problemas incluso provenientes de distintas disciplinas. Con frecuencia, el estudio de los sistemas complejos requiere por su naturaleza de un tratamiento transdisciplinario que va más allá de la multidisciplinaria al conjugar no solo las herramientas, sino la forma de pensamiento, de percepción de problemas de las disciplinas involucradas.

Es común que un sistema complejo presente una fenomenología diversa a distintas escalas, se habla entonces de una jerarquía de niveles de descripción. En buena medida el objeto de los estudios de complejidad es esclarecer los procesos que permiten el tránsito entre estas jerarquías, por ejemplo mecanismos de retroalimentación como es el caso de la auto-organización. Un caso de jerarquización se puede apreciar en un ecosistema para el cual se pueden llevar a cabo estudios a nivel de individuos y de comunidades, por ejemplo, árboles y bosques. Al nivel de descripción de bosques pueden emerger comportamientos colectivos no previstos al contemplar

el nivel de árboles, el elemento sorpresa es recurrente en los sistemas complejos. Es más, todos estos sistemas se encuentran inmersos en un ambiente que interviene en la determinación de los valores de los parámetros que regulan el cambio espacio-temporal del sistema, puede suceder que las propiedades emergentes modifiquen ese ambiente, cambiando no solo los valores de esos parámetros sino la propia regla de evolución. En estos casos se habla de sistemas complejos adaptativos. Este comportamiento tan socorrido en la biología ha permeado en tiempos recientes la física, donde se habla de materia inerte adaptativa.

Debido a la presencia de propiedades emergentes para las que no es necesaria ni suficiente la descripción detallada de los comportamientos de los componentes se dice con frecuencia que en los sistemas complejos el todo es mayor que la suma de las partes y que el estudio de la complejidad es contrario al reduccionismo que presupone que para comprender un fenómeno basta el entendimiento de los componentes más elementales. A mi parecer el enfoque de los sistemas complejos complementa los estudios reduccionistas, diferentes aspectos de un mismo problema pueden requerir de tratamientos típicamente reduccionistas o de un análisis propio de los sistemas complejos. En general el tránsito entre las jerarquías es de doble sentido y las dinámicas presentes en diferentes niveles de descripción están interrelacionadas.

A estas alturas, si planteamos la pregunta de qué es un sistema complejo, una respuesta razonable emerge de la concatenación adecuada de las palabras resaltadas en el texto para su descripción.

¿Y cuál es el estado de la investigación sobre sistemas complejos en Morelos? Ese es el tema de una próxima contribución a esta sección de la Academia de Ciencias de Morelos.

[1] Martínez Mekler G. y Cocho G. 1998, “Al borde del milenio, caos, crisis y complejidad” en Ciencias de la Materia, Génesis y Evolución de sus Conceptos Fundamentales, Luis de la Peña comp., Serie Aprender a Aprender, Siglo XXI Editores, México D.F., pp 265-269

[2] Waddington, C.H. 1977, Tools of Thought, Jonathan Cape, Londres.

# Explorando la complejidad sin complejos Segunda parte

**Gustavo Martínez Mekler**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Durante el último siglo el desarrollo científico ha estado marcado por una tendencia hacia la hiperespecialización. La formación de expertos en áreas del conocimiento muy específicas ha sido la norma. Esto ha permitido avances espectaculares en múltiples disciplinas tanto a nivel experimental como teórico, contemplando aspectos de ciencia básica y en el ámbito tecnológico. Basta ver el aumento vertiginoso en la capacidad de cómputo, las supercomputadoras de hace 30 años se encuentran actualmente en el escritorio de millones de hogares; ahora se habla de la nanotecnología operante a escalas de una milmillonésima de un metro y se mandan naves espaciales a distancias de mil millones de kilómetros. Pero así como estos logros son innegables, también es innegable que el mundo en que vivimos es día a día más complejo. Se presentan situaciones descritas por redes de interacciones cada vez más entrelazadas, en continuo cambio, a pasos cada vez más acelerados. Para lidiar con ello se requiere del desarrollo de una plataforma de estudio capaz de abordar variedad de fenómenos presentes en la naturaleza y sociedad, donde participen múltiples disciplinas con un enfoque integrador: se requiere de las Ciencias de la Complejidad. El reto es aprovechar los avances logrados, incorporándolos en nuevas formas de pensamiento que contribuyan al desarrollo de herramientas de análisis novedosas que permitan realizar estudios de trascendencia.

En la primera parte de este escrito se presentó una caracterización de sistemas complejos que pudiera resumirse como sistemas con muchos componentes en interacción que dan lugar a comportamientos colectivos emergentes que se interrelacionan. Estos sistemas presentan varios niveles de descripción siendo el tránsito entre ellos uno de los temas de estudio. Por ejemplo, en ellos el conocimiento detallado a nivel microscópico de un fenómeno no basta para el entendimiento macroscópico, más aún, algunos aspectos de ese detalle pueden incluso ser irrelevantes. Es común que los sistemas complejos presenten adaptación al entorno así como diversos grados de retroalimentación.

## **Algo de historia**

Las anteriores características fomentan el desarrollo de un pensamiento analógico que tienda puentes entre sucesos de naturaleza diversa y entre las disciplinas que tradicionalmente los estudian. Sin pretender un recuento histórico a fondo y más bien con un

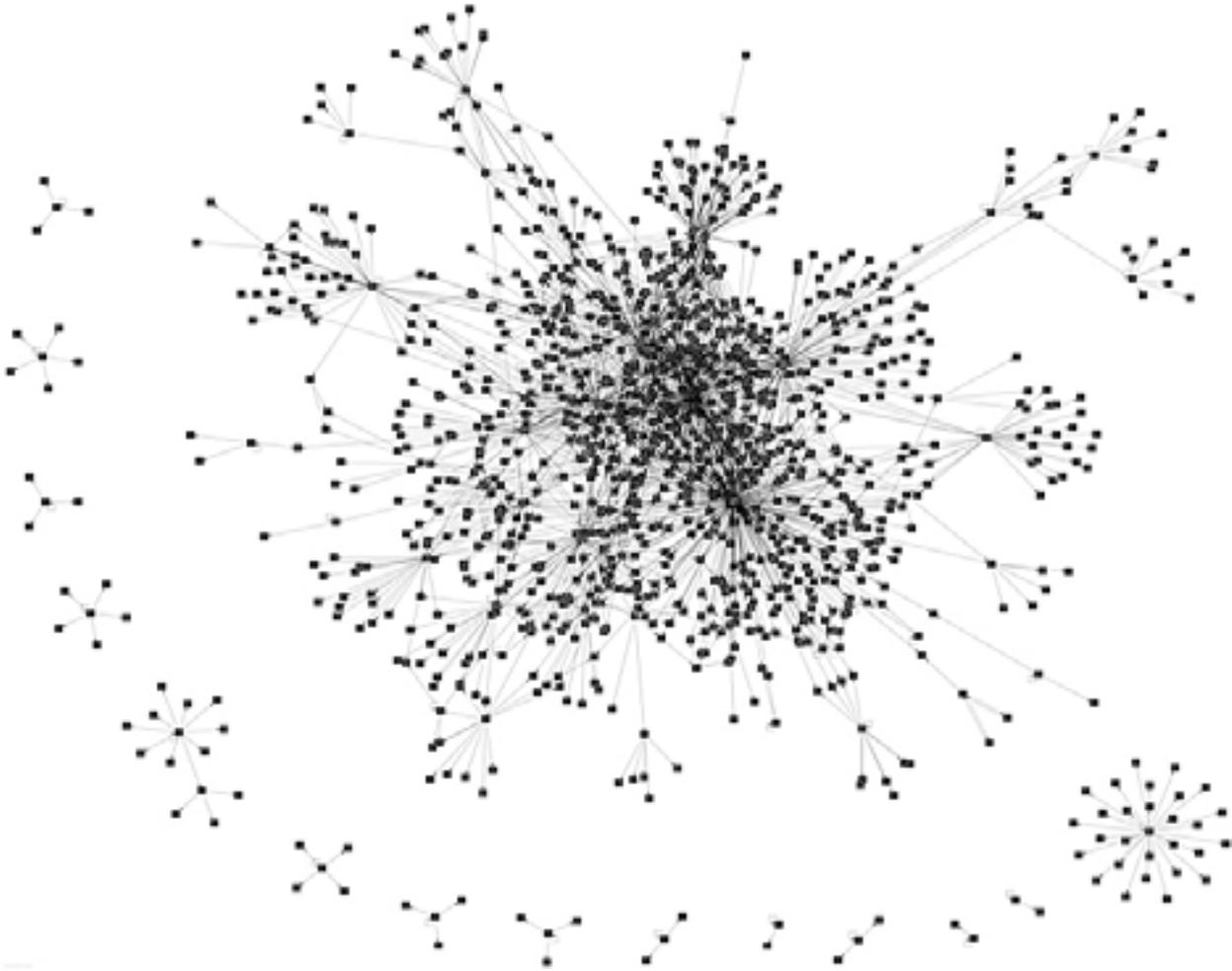
propósito de ejemplificar el origen multidisciplinario de este pensamiento, vienen a la mente los siguientes personajes: El francés René Thom (1923-2002), medalla Fields, que es el equivalente de un premio Nobel de Matemáticas, por el desarrollo de la llamada teoría de catástrofes con la cual demuestra que hay comportamientos universales para la generación de formas. Los estadounidenses Kenneth Wilson (1936- ) , premio Nobel de Física, por sus estudios sobre comportamientos universales en las transiciones de fase como el paso de líquido a gas cuando hierve el agua, y Kenneth Arrow (1921- ), premio Nobel de Economía, quien participó en la fundación del Instituto de Santa Fe dedicado al estudio de los sistemas complejos. El belga Ilya Prigogine (1917-2003) premio Nobel de Química quien desarrolló el concepto de estructuras disipativas lejos del equilibrio, como es el caso de los seres vivos.

## **Los sistemas complejos en México**

En México, un visionario y principal promotor de los estudios de la complejidad es Germinal Cocho, médico y físico en partículas elementales, quien se adelantó a los tiempos, incluso a nivel internacional, con proyectos en el Instituto de Física de la UNAM desde 1977. Como resultado de sus iniciativas se desarrolló un Programa de Ciencia y Sociedad, así como un grupo de Biomatemáticas, ambos en la Facultad de Ciencias, UNAM, y se conformó el Departamento de Sistemas Complejos en el Instituto de Física, UNAM, de los primeros a nivel mundial. Una breve reseña sobre estos desarrollos puede consultarse en la referencia [1] donde también se mencionan iniciativas llevadas a cabo en otras instituciones del país.

## **El caso Morelos.**

Morelos ha sido terreno fértil para el desarrollo de las Ciencias de la Complejidad, hasta donde es de mi conocimiento se cuenta con el Grupo de Fenómenos No-lineales y Complejidad del Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM, así como iniciativas en la Facultad de Ciencias de la UAEM y el Centro de Investigación en Energía de la UNAM. De hecho, en varias ocasiones se realizan investigaciones con el enfoque de los sistemas complejos sin que esto se indique explícitamente. Algunos temas que se han abordado, muchos de ellos en colaboración con otros grupos del país, se relacionan con la evolución de secuencias genéticas del VIH,



**COMPLEJIDAD** Red de regulación genética de la bacteria *E. Coli*, los 1432 puntos representan genes y las líneas indican enlaces de regulación genética. Se utilizó la base de datos RegulónDB elaborada por el Centro de Ciencias Genómicas, la figura es cortesía de Maximino Aldana del Instituto de Ciencias Físicas, ambas instituciones pertenecen al Campus Morelos de la UNAM.

embriología, diferenciación celular, redes regulatorias genéticas, redes de señalización bioquímica, cinética electroquímica, movimiento colectivo y comportamiento social de animales, epilepsia, origen de la vida, ritmos cardiacos, distribuciones urbanas, propagación de rumores, universalidad en ciencias y artes, sucesión ecológica y vulcanismo por mencionar algunos. En todos los casos los estudios son altamente interdisciplinarios. Las herramientas que se han utilizado provienen en buena medida de la física estadística, dinámicas no-lineales, procesos azarosos y cálculo numérico. El desarrollo de una matemática adecuada para los estudios de la complejidad es uno de los grandes retos. Por lo pronto se están haciendo avances considerables de esquemas de cómputo innovadores. También a nivel de informática se requiere de avances considerables para manejo de enormes acervos, por ejemplo desarrollos para la llamada minería de datos.

Si bien por ahora las ciencias de la vida han sido el nicho natural de los estudios de la complejidad, la incursión en las ciencias sociales es inminente. El

gran desafío es la implementación de los estudios de complejidad para la solución de problemas nacionales que contribuyan a un mayor bienestar y equidad social. Para ello se requiere de un esfuerzo encaminado a coordinar y aglutinar los grupos de estudio de los sistemas complejos dispersos en el país, así como fomentar la formación de nuevas generaciones. Una iniciativa que se ha venido trabajando con este propósito es la conformación un Centro de Ciencias de la Complejidad que opere a nivel nacional donde investigadores de todo el país pudiesen realizar estancias académicas, estimulando así el desarrollo del área. Uno de los objetivos del Centro sería la conformación de un Posgrado en Ciencias de la Complejidad, que bien podría implementarse como proyecto conjunto de la UAEM-UNAM.

[1] Martínez Mekler, G, "Una Aproximación a los Sistemas Complejos", Ciencias, Revista de Difusión Num. 59 (2000) 12.



**LAS MATEMÁTICAS,  
MÚSICA INCOMPARABLE  
PARA EL INTELECTO HUMANO**





# Prólogo

Esta es una colección de escritos en la que se puede apreciar la inmensa variedad de ámbitos del pensamiento y de la vida en los que las matemáticas están presentes. En ella el lector podrá encontrar relatos históricos, aventuras de la imaginación, educación matemática y descripciones del estatus del desarrollo y enseñanza de las matemáticas en lugares lejanos como África.

Pero, ¿qué son las matemáticas?, ¿porqué con ellas podemos describir aspectos disímbolos de la realidad? ¿Son acaso un lenguaje? Galileo nos obsequió con esa deliciosa frase de que el libro de la naturaleza está escrito con símbolos matemáticos. La frase revela la postura platónica de Galileo, también conocida como interpretación “realista” de las matemáticas, que nos dice que, hubiera o no matemáticos, la matemática está ahí, contenida de algún modo en la realidad esperando ser descubierta. Existen, sin embargo, otras formas de entender las matemáticas. La “formalista”, apelando a su pureza y rigor lógico, o la “invencionista”, para la cual las matemáticas sólo son eso, una invención de la mente humana que no se descubre. Estas interpretaciones han tenido consecuencias importantes en la extensión y comprensión del significado de las matemáticas pero quizá sea la interpretación “constructivista”, empeñada en la construcción secuencial de las proposiciones matemáticas a partir de elementos fundamentales, la que ha esclarecido la razón por la cual son tan extrañamente eficaces en la descripción del mundo real.

El tejido constituido por las matemáticas y la comprensión de lo natural es muy sorprendente en el caso de la física. Ambas se han desarrollado a la par de modo que en muchos ejemplos la matemática impulsó la comprensión física de los fenómenos naturales y en otros, el deseo de entenderlos llevó a la creación de nuevas ramas de la matemática. Desde que la aritmética saltó a ser álgebra permitiendo a las matemáticas convertirse en un lenguaje útil para solucionar problemas, mucha agua ha corrido por el río de esa historia. En nuestros días, vivimos una etapa

en la que las matemáticas están tomando una fuerte inspiración de la física con el descubrimiento de los fenómenos no lineales y con la búsqueda de las teorías del todo cuyo representante más conspicuo quizás sea la teoría de las supercuerdas. Y este entramado ha sido un fenómeno doblemente interesante porque algunos de los métodos matemáticos encontrados han tenido aplicación en la descripción de acontecimientos sociales y económicos.

El preeminente papel de las matemáticas en todos los aspectos de nuestras vidas puede entenderse por hallazgos realizados recientemente que muestran la existencia de estructuras en el cerebro humano que evolucionaron asociadas al desarrollo de la representación del conocimiento aritmético básico. La confirmación de dichos hallazgos nos permitiría, sin mayor reparo, afirmar que el fundamento último de las matemáticas se encuentra en representaciones que han quedado incorporadas al cerebro humano en el curso de la evolución. Explícame el mundo, tú, que estás hecho de mundo.

El conjunto de relatos presentados en este capítulo es, a la vez que una invitación, un reto a aprender a disfrutar de las matemáticas. A través de ellos el lector viajará por todo el mundo, conocerá personajes inolvidables, resolverá atrevidos e intrigantes acertijos, en fin, y todo ello en medio de una inteligente, amena y por momentos hilarante escritura de los autores que son, no había necesidad de decirlo, expertos en sus respectivos campos.

Personalmente, me quedo con la idea de que las matemáticas son tanto un lenguaje como un arte, tanto una invención como un formalismo y usted, lector, quizá sin compartir enteramente lo anterior, lo que sin duda aceptará conmigo es que las matemáticas son un deleite, un delicioso manjar, una música incomparable de belleza insuperable para el intelecto humano.

Federico Vázquez Hurtado



# ¿Por qué las matemáticas parecen difíciles?

**Luis Javier Álvarez**

Instituto de Matemáticas, Unidad Cuernavaca, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Hace ya mucho tiempo que es un lugar común que la mayoría de la gente diga que las matemáticas “no se le dan”. A esta declaración implícita de humildad viene inmediatamente asociada la reflexión: “es que mi maestro era muy malo, no explicaba bien”. Este es quizás el problema generalizado de la enseñanza de las ciencias duras, las matemáticas, la física y la química en muchos países, incluido México. Por otra parte, hay abundantes estudios desde puntos de vista muy diversos, acerca de la naturaleza de las matemáticas. En todos los casos, se llega a la conclusión de que los conceptos elementales de las matemáticas son concepciones que surgen a partir de nociones del mundo que nos rodea y de la intuición. Por ejemplo, hay la creencia extendida de que el concepto de número está estrechamente unido a la noción de tiempo, y a su sucesión temporal. Otros piensan que el número tiene más que ver con la percepción espacial y basan el concepto de número en la percepción

simultánea de diferentes objetos que están próximos unos de otros. Esto en el campo de la filosofía, pero más importante es qué pasa con los niños.

En psicología del conocimiento y neurociencias se muestra que, salvo por un número reducido de niños que padecen dislexia de origen genético o perinatal, todos los niños tienen una intuición aritmética a muy temprana edad. Desde el primer año de vida esta intuición se manifiesta en la habilidad de evaluar cantidades tanto continuas como discretas y, en particular, el número exacto de objetos de una colección cuando son menos de tres y aproximado cuando son de cuatro en adelante. A partir de esa edad, los niños son ya capaces de llevar a cabo operaciones mentales elementales de comparación y de suma y sustracción aproximadas. Este entendimiento intuitivo de cantidades es uno de los ingredientes que subyacen al ulterior aprendizaje del lenguaje de los números y de algoritmos espontáneos incluyendo, en



*“Todos los niños tienen una intuición aritmética a muy temprana edad”.*

particular, aquellos basados en contar con los dedos de las manos. Esto se desarrolla espontáneamente al margen de cualquier proceso educativo. Así, los niños llegan a la escuela con un paquete de intuición y habilidades que no deben despreciarse ni atacarse ya que sirven de base para el entendimiento del objetivo de los cálculos aritméticos.

Con lo expuesto hasta aquí, se puede uno preguntar: ¿Por qué si los conceptos son intuitivos para la mente humana entonces algo que surge de ahí es difícil de entender? La respuesta la han dado intuitiva e implícitamente todos aquellos a los que se les hacen difíciles las matemáticas: es un problema de la enseñanza formal. Pero no de la enseñanza formal en sí misma, sino de la mal entendida enseñanza formal. Los primeros dos tropiezos en el aprendizaje de las matemáticas son en la aritmética y en el álgebra.

La enseñanza de la aritmética debe tener dos objetivos: primero, proveer a los niños de una base sólida para realizar operaciones aritméticas automáticamente y segundo debe mantener constantemente conexión entre esos cálculos y su significado cuantitativo y con la solución de problemas concretos. El peor error es la enseñanza de fórmulas aritméticas disociadas de su significado y por tanto de su entendimiento. Frecuentemente los cálculos aritméticos se aprenden superficialmente. Los niños se forman una imagen imperfecta o completamente errónea de la fórmula a seguir sin entender sus fundamentos y significado. La automatización en la aritmética no se debe hacer en detrimento del entendimiento. Se debe dar prioridad a la adquisición de rutinas sólidas y bien entendidas y a un paso fluido entre la aritmética formal y la intuición acerca de las cantidades que se manipulan.

La aritmética, además, debe enseñarse en contacto estrecho con otras materias, como geometría, español, ciencias naturales, geografía, música y deportes de manera que quede íntimamente relacionada con situaciones concretas. Esto constituye un complemento indispensable y una base para el desarrollo futuro de capacidades de abstracción. Su enseñanza, basada en la intuición aritmética que todos los niños tienen, requiere juego y trabajo. Se debe empezar con la práctica simultánea de contar y las cuatro operaciones con complejidad gradual, desde las clases en el jardín de niños, hasta números decimales y fracciones al final de la escuela primaria.

En cuanto al álgebra, posiblemente el principal problema de la enseñanza o aprendizaje esté representado por la transición del pensamiento en términos aritméticos al pensamiento algebraico. Dicho de manera muy simple, se pretende pasar de realizar operaciones con números a hacer operaciones con letras. Como este paso no se puede realizar rápidamente, en este enfoque, se espera que los alumnos se acostumbren progresivamente al grado de abstracción que implica. Es justamente en este punto en donde en lugar de aprender y gustar de las “matemáticas” los estudiantes que no son capaces

de acostumbrarse quedan vacunados en contra de las verdaderas matemáticas y en buena medida del pensamiento abstracto, para toda su vida.

Esta transición, así planteada, es bastante artificial y va en contra de la intuición. Si echamos un ojo a la historia de la transición entre el pensamiento aritmético y el pensamiento algebraico veremos un posible camino a seguir para guiar a los estudiantes en esta transición.

La palabra “álgebra” tiene su origen en el título del importante trabajo del matemático del siglo IX Mohammed ibn Musa Al-Khwarizmi: *Ilm-al-jabr-wa'l-muga-balah*. Que significa “ciencia de la transposición y la cancelación”. La palabra *al-jabr* (transposición) se transformó en “álgebra” en la transliteración latina del título. El álgebra, sin embargo no comienza con el trabajo de Al-Khwarizmi sino con el de Diofanto. Matemático griego que vivió entre los años 200 y 290, aproximadamente.

Desde el siglo III se plantean, implícitamente, lo que podemos llamar *juegos algebraicos*. Sin embargo, no es sino hasta los siglos XVII y XVIII cuando se reconoce por Isaac Newton, físico y matemático británico (1643-1727), que “Para resolver un problema referente a números o relaciones abstractas de cantidades, basta con traducir dicho problema de la lengua usual al idioma algebraico”. Comienza así con una tradición que se considera el arte de plantear ecuaciones. A finales del siglo XIX y principios del XX se desarrolló, en varias partes del mundo, una cantidad descomunal de problemas. Un ejemplo notable es el de Henry Ernest Dudeney, británico que se destaca en la resolución de persistentes enigmas. Algunas cuestiones que habían resistido los métodos de expertos matemáticos, son dilucidadas por este personaje. La habilidad matemática la adquirió Dudeney por su propia cuenta, acaso por no haber asistido nunca a una escuela y es esta la razón por la que aquí se le menciona. Lo que esto significa es que, en efecto, la intuición juega un papel de primordial importancia en el entendimiento matemático y que la enseñanza de las matemáticas no debe limitar de ninguna manera esa intuición, sino alimentarla.

Para enseñar a los niños el camino entre la aritmética y el álgebra en el nivel de secundaria, se deben utilizar juegos, acertijos, rompecabezas que aviven la imaginación y la intuición. Al igual que en la aritmética, no tiene sentido plantear fórmulas disociadas de su significado. Las operaciones algebraicas deben también automatizarse para que en la solución de un problema no se dé más importancia a los métodos de operar que al significado de las ecuaciones y de sus soluciones.

No debe olvidarse que el deleite intelectual y los retos de las matemáticas son indudablemente forjados desde los primeros años de escuela. El uso temprano de juegos, dibujos, construcciones, problemas y rompecabezas matemáticos excitantes, atraen el interés de los niños y pueden motivarlos para el esfuerzo posterior necesario para aprender matemáticas en la escuela.

# Matemáticas en África

**Kurt Bernardo Wolf**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A.C.

¿Quién no ha sentido fascinación por África, por su dura naturaleza y sus pueblos numerosos? Su compacta masa continental en realidad alberga dos Áfricas: la del norte y la que está al sur del gran desierto del Sáhara. La primera albergó culturas muy ricas y diversas, que participaron en la aventura de las matemáticas en el Egipto de los faraones, que tuvieron a Euclides en Alejandría, y que durante la ilustración árabe enseñaron ciencia a Europa. Pero aquí quiero referirme a la segunda, la que se extiende desde los rales pastizales del Sahel hasta la cuenca húmeda del río Congo; y de ella, lo que ocurre alrededor del Golfo de Guinea en el campo de las matemáticas. En esta región se agolpan una veintena de naciones entre las más pobres del mundo.

Me ha tocado andar por esa África cada veinte años. La primera vez fue por aventura, la segunda con el pretexto de algo religioso, y ahora con el motivo confesable de ser conferencista en el sexto Taller Internacional sobre Problemas Contemporáneos en Física Matemática (COPROMAPH6, nov. 2009) que se reúne cada dos años en Cotonú, República de Benín, por la reiterada invitación del Profesor Norbert M. Hounkonnou para conocer su país y participar en su desarrollo de la cultura matemática. La historia reciente no ha sido generosa con estos esfuerzos; a la mitad de 60s, los países eran recién independientes y contaban con el liderazgo reconocible de estadistas como Julius Nyerere en Tanzania, Henri Houphouët-Boigny en Costa de Marfil, y Kwame Nkrumah en Ghana. A pesar del lamentable fin de Patrice Lumumba en el Congo, se tenía la esperanza de un rápido y feliz desarrollo. Pero no fue así. Muchos padres-de-la-patria terminaron como dictadores alimentados por las conveniencias partidarias de la Guerra Fría, y la presencia de industrias mineras y petroleras de sus metrópolis. Los golpes de Estado se hicieron corrientes y varias veces llevaron al genocidio. Con el colapso de la Unión Soviética y el descenso de las infusiones en dinero y armas, las administraciones se han vuelto más pragmáticas; hoy los gobiernos de la región son más estables y las instituciones pueden comenzar a funcionar.

Fuimos 142 participantes: 2 de Burkina Faso y de Congo-Brazzaville, 3 de Níger, 4 de Ghana, 5 de Senegal, Camerún y Congo-Kinshasa, 6 de Costa de Marfil, 9 de Togo, 17 de Nigeria, y 70 de Benín; más 14 de fuera del área (Francia, Bélgica, India, Suecia, Suiza, Canadá, EUA y México). Se presentaron 60 trabajos. Hubo conferencias sobre tópicos puros como el estudio de geodésicas sobre variedades

topológicas y de análisis funcional. Varias pláticas versaron sobre física matemática, tratando los estados coherentes con métodos que comparto, originados en las universidades de Montreal (Canadá), Lovaina (Bélgica) y Paris VII (Francia), pues éstas han tenido programas de posgrado y colaboración dirigidos al apoyo de estudiantes e investigadores africanos. En matemáticas aplicadas escuchamos una veintena de trabajos sobre ecuaciones diferenciales no-lineales, técnicas de muestreo y estadística dirigidas al estudio oceanográfico de la corriente del Golfo de Guinea. Esta corriente fluye hacia el este bordeando la costa y su velocidad es muy alta: 1 metro por segundo (m/s), visible a simple vista; ésta sirvió a los primeros marinos portugueses que buscaban bordear África en su búsqueda de una ruta a la India. Su dirección es contraria a la corriente del Atlántico Sur que sube desde Angola y a la dirección de los vientos alisios que soplan hacia el oeste, haciendo del golfo un mar tumultuoso, con corrientes y contracorrientes a distintas temperaturas que levantan nutrientes del fondo y dan lugar a pesca abundante; pero es extremadamente peligroso para los pescadores locales. Por ello interesa





saber cómo monitorear las condiciones submarinas con el objetivo de llegar a emitir boletines y pronósticos a la población, cuando tal sistema de medición pueda ser instalado.

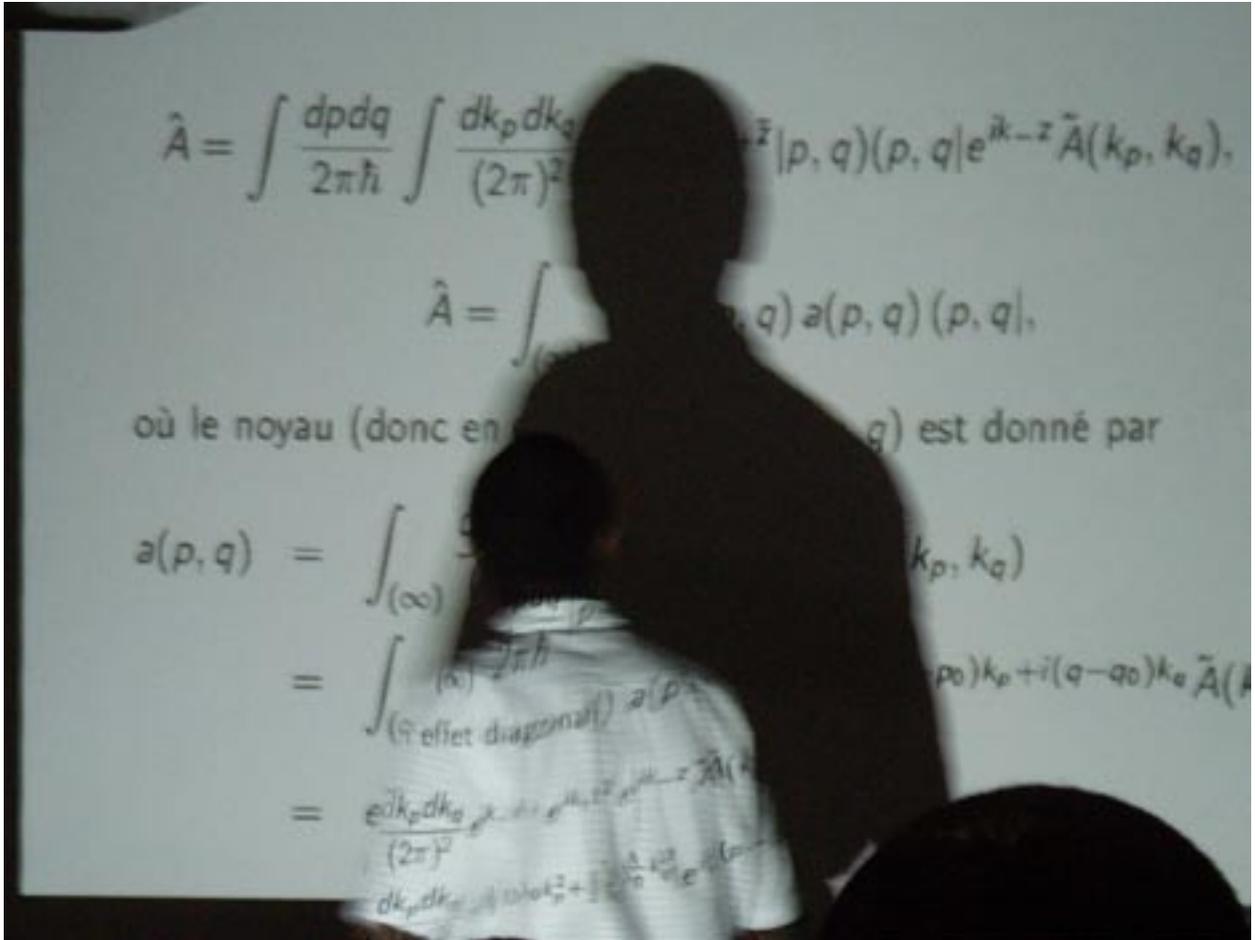
—*My name is Wuzu*, me dijo tímidamente un doctorante de Ghana, delgado y sonriente, *I don't speak French* [traducción: Mi nombre es Wuzu... no hablo francés]. La docena de países con pie en el Golfo de Guinea se dividen en anglófonos (Gambia, Sierra Leona, Liberia, Ghana y Nigeria) y francófonos el resto y mayoría; todos con acentos difíciles de entender, con espectros reducidos de vocales, pérdida casi total de terminaciones, y una sintaxis *sui generis*. Sin embargo, se agradece a los países coloniales haber legado una lengua franca. En Benín por ejemplo, hay 6 grupos lingüísticos divididos en 54 dialectos locales,

y aunque sólo parte de la población habla francés, éste es el único idioma con el que todas las etnias se pueden comunicar, entre ellas, con el gobierno y con el mundo. En nuestra reunión el idioma oficial fue el inglés porque, como explicó sucintamente el Prof. Hounkonnou, es el idioma que prevalece en la comunicación de la ciencia.

Al tiempo de las independencias africanas (1960-1965), la enseñanza de matemáticas elementales para carreras como la ingeniería se daba en las pocas universidades técnicas que existían, pero no había programas de posgrado ni institutos de investigación. Durante las últimas tres décadas se han creado un puñado de centros, entre ellos el *Institut de Mathématiques et de Sciences Physiques* (IMSP) en Abomey-Calavi, Benín, en 1985; en 2001 se otorgó la Cátedra en Física Matemática y Aplicaciones al Prof. Hounkonnou, apoyado por la UNESCO, la Academia de Ciencias del Mundo en Desarrollo, y el Centro Internacional de Física Teórica, de Trieste. A la fecha, el IMSP cuenta con 91 estudiantes y ha graduado 68 maestros en ciencias y 40 doctores provenientes de todos los países de la región. Se reciben cinco doctorados al año. En este programa se utilizan convenios con varias universidades de Francia, Bélgica y Canadá en un esquema “sándwich” donde los estudiantes cursan dos años en esos países, pero el año de inicio de los estudios y el de su terminación con la defensa de tesis se hacen en Benín. Así se reduce la fuga de cerebros, muy propensos a emigrar al Primer Mundo de los sueños de muchos africanos —y mexicanos.



Participantes del sexto Taller Internacional sobre Problemas Contemporáneos en Física Matemática (COPROMAPH6), tomada por el autor. El Prof. Norbert Hounkonnou (IMSP, organizador) es el segundo de izquierda a derecha en la primera fila.



–Mi familia se oponía; querían que fuera político, pero yo voy a ser matemático, aunque los maestros de escuela ganan muy poco... me platicaba Kounir, un joven alto y fornido de Ugadugú, Burkina Faso, quien ostentaba cicatrices tribales en las mejillas. Es una visión esperanzada y romántica, dadas las precarias condiciones que padecen los países del Sahel sin salida al mar. Para las élites gobernantes, la ciencia básica no se considera una inversión productiva sino, si acaso, como una pluma de adorno. Las tecnologías necesarias para manejar los puertos y aeropuertos, los ministerios, las vías férreas, el suministro de electricidad y agua, y las comunicaciones, generalmente son encomendadas –con todo y técnicos– a compañías extranjeras. Se obtienen peces, pero poco del saber pescar.

En términos de una perspectiva del desarrollo en matemáticas de todos los países de las regiones occidental y central, Benín se cuenta entre los de mayor tradición. Buscando en internet puedo reportar que en las Olimpiadas Pan-Africanas en Matemáticas, organizadas por la Unión Matemática Africana, Benín ha estado en los primeros lugares por equipo; aunque en la competencia que tuvo lugar en Ugadugú en 2007 sólo participaron 19 estudiantes del área que nos ocupa –hay que separarla del África mediterránea y de la anglófona, pues su nivel y tasa de desarrollo

son muy distintos. Se habla de crear una Universidad Pan-Africana, pero las rivalidades nacionales lo han impedido; en las (pocas) estadísticas sale a flote, por ejemplo, la competencia entre las agencias donadoras y el nivel y calidad de los grados que dicen otorgar algunas universidades. Así, el número de doctorados en matemáticas reportados en las referencias [1] y [2] son: Benín: 28/29, Burkina Faso: 14/12, Camerún: 36/26, Chad: 0/1, Congo-Kinshasa: 10/0, Costa de Marfil: 4/15, Ghana: 16/0, Mali: 2/16, Níger: 5/3, Nigeria: 43/88, Senegal: 18/17, –y cero en los demás. De estos profesionistas, una proporción considerable trabaja de hecho fuera de su país (de acuerdo a la referencia [1]). Tal vez el dato más revelador es que la contribución de toda el África Occidental a la literatura matemática es el 0.08 % de la mundial (de acuerdo a la referencia [2]), y de la Central, el 0.03 %.

Pero es el futuro de la región lo que más preocupa. Benín tiene nueve millones de habitantes en sus 112,622 km<sup>2</sup>, una densidad 50 % mayor que la de México, y un promedio de 5.47 hijos por mujer, con 10 % de mortalidad infantil. La mayor tasa de crecimiento poblacional del planeta está en África occidental, bajo un Sáhara que se expande con el cambio climático sobre el tapete verde de la llanura costera, exacerbando las sequías periódicas y hambrunas. Como México,



*El IMSP organiza el concurso "Miss Matemáticas-Física y Química" para motivar a jovencitas hacia las ciencias. La foto muestra a las ganadoras de 2008, a quienes les entregó el premio el Ministro de Educación Superior e Investigación de Benin. Foto tomada del Reporte Anual 2008 del IMSP ([www.imsp-uac.org](http://www.imsp-uac.org)).*

Benín no es autosuficiente en alimentos. El cultivo de las ciencias puede parecer tardío y su promesa es a largo plazo; sin embargo, es indispensable si se aspira a formar parte de un mundo moderno, civilizado y generoso, como fue el sueño del profesor Hounkonnou y de sus asociados cuando iniciaron su labor.

Referencias:

- [1]<http://www.math.buffalo.edu/mad/Africa-today/index.html>
- [2][http://www.mathunion.org/fileadmin/IMU/Report/Mathematics\\_in\\_Africa\\_Challenges\\_Opportunities.pdf](http://www.mathunion.org/fileadmin/IMU/Report/Mathematics_in_Africa_Challenges_Opportunities.pdf)

# El cuadrado mágico de Albrecht Dürero

## Primera parte

**Radmila Bulajich**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
 Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

Alberto Dürero (1471-1528) de padres húngaros, nació en Nuremberg, Alemania, en una familia de dieciocho hermanos, y estaba destinado a seguir los pasos de su padre en el negocio de la joyería. A los trece años, en contra de la voluntad de su padre, decidió dedicarse a la pintura y poco después se convirtió en aprendiz de pintor. En 1490, Dürero se dedicó a viajar y a desarrollar la idea de un arte basado en las matemáticas. De regreso, en Nuremberg, estudió obras de matemáticos y artistas: Euclides, Vitruvio, Pacioli, Alberti entre otros.

Alberto Dürero es considerado por muchos el mejor de los artistas alemanes del Renacimiento, además, en 1523, finalizó su “Tratado de las proporciones”, pero el contenido matemático era demasiado elevado para los lectores, lo que le llevó a editar (1525) una obra más accesible, “Tratado sobre el medir”. Aparte de las primeras obras sobre aritmética comercial, éste fue el primer libro de matemáticas impreso en Alemania, por lo que Dürero se convirtió en uno de los matemáticos más importantes del Renacimiento. La obra se centra en la geometría plana y en la descripción de objetos sólidos.

Ya siendo una persona con un gran reconocimiento, hizo su enigmático grabado “Melancolía I” (1514). En la parte superior izquierda de la pintura encontramos uno de los cuadrados mágicos de  $4 \times 4$  más sorprendentes. Un cuadrado mágico es un arreglo de números o letras con una distribución particular. Es decir, un cuadrado mágico de números es un arreglo de  $N^2$  casillas, donde  $N$  representa un entero positivo mayor o igual a 3, en el cual en cada una de las casillas encontramos un número entero distinto. La palabra mágico se refiere a que la suma de los números en un renglón, en una columna o en la diagonal principal, es la misma.

Cornelius Agrippa (1486-1535) físico, astrólogo y teólogo, relacionó los cuadrados mágicos de  $4 \times 4$  con Júpiter y se creía que estos cuadrados combatían la melancolía, probablemente esta es la razón por la cual Dürero lo integró a su grabado. El primer registro que se tiene de un cuadrado mágico de  $4 \times 4$  es el que aparece en una inscripción, en el friso de una puerta, en Khajuraho, India y data del año 1100 de nuestra era.

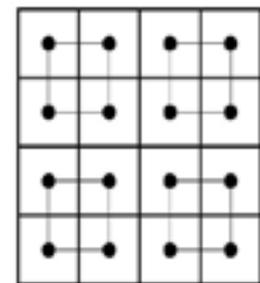
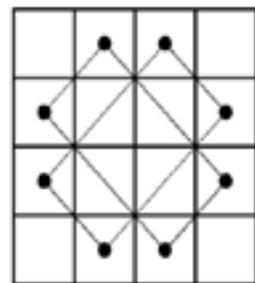
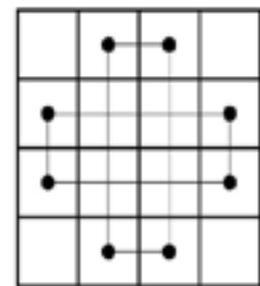
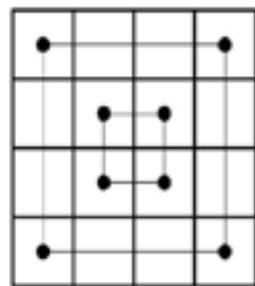
Analicemos el cuadrado mágico que aparece en el cuadro “Melancolía I” de Alberto Dürero (ver pág. 154). Este cuadrado contiene los primeros 16 números y posee propiedades fascinantes. Los dos

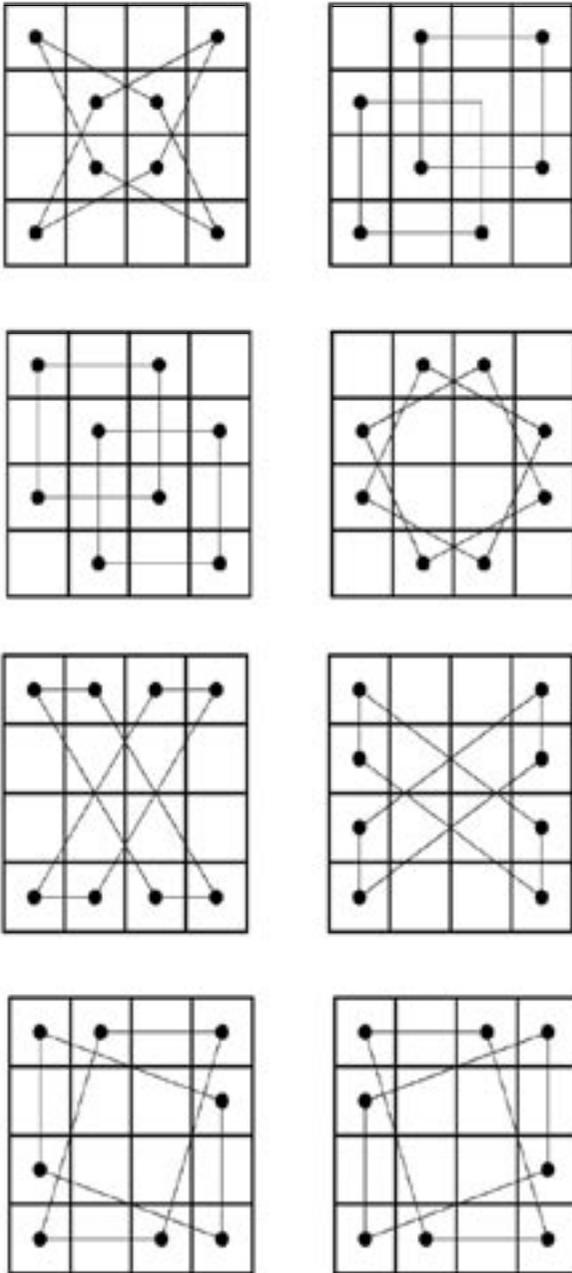
números centrales en el último renglón son 15 y 14, si los juntamos (1514) nos indican el año en que Dürero terminó su obra.

16	3	2	13
5	10	11	8
9	6	7	12
4	15	14	1

Los renglones, columnas y diagonales suman 34, además 34 es la suma de los números que están en las esquinas ( $16 + 13 + 4 + 1$ ) y del cuadrado central ( $10 + 11 + 6 + 7$ ). La suma de los números restantes es:  $68 = 2 \times 34 = 12 + 8 + 3 + 2 + 5 + 9 + 15 + 14$ .

Si dibujamos sobre el cuadrado mágico de Dürero los siguientes polígonos y sumamos los números que aparecen en los vértices de los mismos, marcados por puntos, podemos comprobar que todas las sumas son iguales a 34.





Albrecht Dürero.

Todo esto es también cierto si intercambiamos los renglones por columnas. Ahora bien, en este cuadrado también se observa otra bella simetría que consiste en sumar los números que aparecen en los primeros dos renglones y escribirlos en el primer renglón y, sumar los números de los dos últimos renglones y colocarlos en el siguiente renglón, lo mismo hacemos con las columnas, y obtenemos:

21	13	13	21
13	21	21	13

19	15
15	19
15	19
19	15

Otras características interesantes del cuadrado mágico de Dürero que conviene resaltar son, por ejemplo: la suma de los cuadrados de los enteros en el primer y segundo renglón es igual a la suma de los cuadrados de los enteros en el tercer y cuarto renglón, es decir,  $256+9+4+169+25+100+121+64 = 81+36+49+144+16+225+196+1 = 748$ . Este número, 748, es también igual a

- la suma de los cuadrados de los enteros en el primer y tercer renglón
- la suma de los cuadrados de los enteros en el segundo y cuarto renglón
- la suma de los cuadrados de los enteros en las dos diagonales.

Esta última característica está presente también en el cuadrado mágico que se encontró en Khajuraho, India.

En la segunda parte, analizaremos otras maravillosas simetrías en el cuadrado mágico de Alberto Dürero.

# El cuadrado mágico de Albrecht Dürero

## Segunda Parte

**Radmila Bulajich**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
 Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

En la primera parte estudiamos algunas de las características que se pueden encontrar en el cuadrado mágico que aparece en el enigmático grabado “Melancolía I” (1514) de Alberto Dürero.

16	3	2	13
5	10	11	8
9	6	7	12
4	15	14	1

Recuerda, un cuadrado mágico es un arreglo cuadrado de números o letras con una distribución particular. Es decir, un cuadrado mágico de números es un arreglo de  $N^2$  casillas, donde  $N$  representa un entero positivo mayor o igual a 3, en el cual en cada una de las casillas encontramos un número entero distinto. La palabra mágico se refiere a que la suma de los números en un renglón, en una columna o en la diagonal principal, es la misma. En este caso es 34.

Veamos algunas otras propiedades que podemos encontrar en este maravilloso cuadrado.

Si a todos los números que aparecen en el cuadrado mágico de Dürero les restamos uno tenemos:

15	2	1	12
4	9	10	7
8	5	6	11
3	14	13	0

Ahora vamos a escribir estos números en el sistema binario, es decir, en base 2.

La representación binaria de un número es posicional y únicamente utiliza los dígitos 0 y

1. Para entender cómo se escribe un número en el sistema binario o base dos recordemos primero como escribimos un número en el sistema decimal que es el que utilizamos todos los días. Cuando tenemos un número en base diez, nos referimos a sus dígitos como las unidades, decenas, centenas etc. Así por ejemplo el número 3456, decimos que tenemos 3 millares, 4 centenas, 5 decenas y 6 unidades, éste lo podemos escribir como  $3 \cdot 10^3 + 4 \cdot 10^2 + 5 \cdot 10 + 6 \cdot 1$ . Ahora bien, el número 15 en base diez lo podemos escribir en base dos como 1111, que representado en el sistema binario es igual  $15 = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2 + 1 = 8 + 4 + 2 + 1$ . La forma de convertir un número en base diez a un número en base dos, es entonces ver cuántas veces cabe alguna potencia de 2 en el número. Así vemos que el  $8 = 2^3$  cabe una vez en 15 y nos sobran 7. El  $4 = 2^2$  cabe una vez en 7 y nos sobran 3, el  $2 = 2^1$  cabe una vez en 3 y nos sobra un 1. Utilizando este procedimiento, intenta convertir el número 14 a base 2. ¿Qué número obtuviste? Al convertir el número 15 a base 2, obtuvimos un número de 4 dígitos. Ahora queremos escribir todos los números, del 0 al 15, en base dos de manera que cada uno tenga 4 dígitos. Como los ceros en el extremo izquierdo de un número no cambian su valor no importa cuantos ceros aumentemos, por ejemplo, el 15 (en base 10) es igual al 0015, esto mismo es cierto para los números en base 2, así por ejemplo el número 1 en base 2 (que es igual al número 1 en base 10) lo podemos escribir como 0001. En el siguiente cuadrado mágico de Dürero tenemos los números escritos en sistema decimal y binario.

15	2	1	12
1111	0010	0001	1100
4	9	10	7
0100	1001	1010	0111
8	5	6	11
1000	0101	0110	1011
3	14	13	0
0011	1110	1101	0000

Sorprendentemente, si rotamos  $45^\circ$  esta representación binaria del cuadrado mágico de Dürero, a favor de las manecillas del reloj manteniendo el centro fijo, obtenemos un rombo. El número que se encuentra en la parte superior del rombo es la



# Construcción de cuadrados mágicos (usando el método de Loubère)

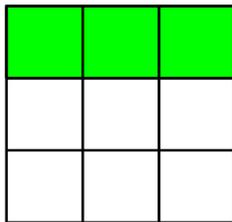
**Radmila Bulajich**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

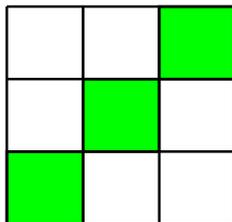
El 24 y 31 de marzo del 2008 se publicaron en este mismo periódico dos artículos sobre el cuadrado mágico de Alberto Durero (Ver: “[http://www.acmor.org.mx/descargas/08\\_mar\\_24\\_durero.pdf](http://www.acmor.org.mx/descargas/08_mar_24_durero.pdf)” [www.acmor.org.mx/descargas/08\\_mar\\_24\\_durero.pdf](http://www.acmor.org.mx/descargas/08_mar_24_durero.pdf))

Algunas personas nos escribieron preguntando si existían métodos para crear estos cuadrados mágicos. Atendiendo a dicha petición, a continuación describimos algunos de ellos.

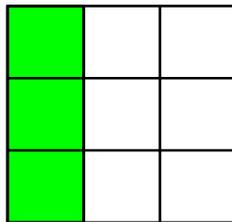
Primero recordemos qué es un cuadrado mágico. Un cuadrado mágico es una arreglo de  $N^2$  casillas, donde  $N$  representa un entero positivo mayor o igual a 3, en el cual en cada una de las casillas encontramos un número entero distinto. La palabra mágico se refiere a que la suma de los números en cada renglón, cada columna o en las dos diagonales principales, es la misma.



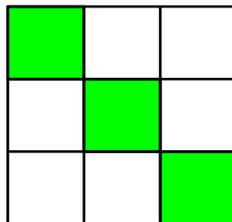
Renglón



Diagonales



Columna



Si los números que acomodamos en el cuadrado mágico son los enteros positivos  $1, 2, \dots, N^2$ , decimos que el cuadrado es de orden  $N$  y el número mágico, es decir, la suma en cada renglón, columna o diagonal será:

$$S = \frac{N(N^2 + 1)}{2}.$$

Este número lo podemos calcular fácilmente considerando la suma de todos los números y dividiéndolo entre el número de renglones o columnas, es decir,

$$\frac{1 + 2 + \dots + N^2}{N} = \frac{\frac{N^2(N^2+1)}{2}}{N} = \frac{N(N^2 + 1)}{2}.$$

Por ejemplo, en el cuadrado de  $3 \times 3$ , el número mágico es  $(1+2+\dots + 9)/3=3(9+1)/2=15$ .

Cuando  $N$  crece, el número de cuadrados mágicos se incrementa rápidamente. En la siguiente tabla se presentan el número de cuadrados mágicos que se pueden construir dependiendo de  $N$ .

N	No. cuadrados mágicos distintos
3	1
4	808
5	68,826,306

En el año de 1693, los 808 cuadrados mágicos de  $4 \times 4$  fueron publicados por el francés Bernard Frénicle de Bessy (1605-1675). En su estudio nunca utilizó métodos matemáticos propiamente dichos para crearlos sino que escribió la lista utilizando el “método de exhaustión”, es decir, probando todos los casos y viendo cuáles de ellos cumplían las propiedades requeridas. No fue hasta 1973 que, gracias al desarrollo de las computadoras, Richard Shroepel (1948-), matemático y programador, calculó que había 275,305,224 cuadrados mágicos de  $5 \times 5$ . El número que aparece en la tabla difiere de éste ya que se eliminaron los cuadrados mágicos que son “iguales” por rotación o reflexión. No se tiene, siquiera, un

Aún cuando los números de un cuadrado no son necesariamente números consecutivos, en éste artículo sólo trabajaremos aquellos que tienen números consecutivos.

número aproximado de cuántos cuadrados mágicos de 6X6 hay.

A lo largo de la historia se han elaborado varios métodos para construir cuadrados mágicos. Para utilizar estos métodos es importante ver los distintos tipos de cuadrados mágicos que podemos hacer:

Cuadrados mágicos de ORDEN IMPAR, son los cuadrados mágicos donde N es un número impar, es decir, de la forma  $2m+1$ , donde m es un entero positivo.

Cuadrados mágicos de orden par, que llamamos PAR SENCILLO, donde N es de la forma  $2(2m+1)$ , donde m es un entero mayor o igual a 0, es decir, el doble de un número impar. Observemos que los números que generamos aquí son los números pares que son divisibles entre 2 pero no entre 4.

Cuadrados mágicos cuyo orden es doblemente par, que llamamos DOBLE PAR, donde N es de la forma  $2(2m)$ , para m un entero, es decir, el doble de un número par. El número de cuadraditos en cada uno de los lados de los cuadrados se pueden dividir entre 2 y 4.

Los métodos para construir cuadrados mágicos varían en complejidad. Los cuadrados mágicos más difíciles de construir son los de orden par sencillo. Empezamos construyendo cuadrados mágicos de orden impar. El método que se describirá a continuación (Método de Loubère) no funciona para construir los cuadrados mágicos de orden doblemente par o par sencillo.

En 1693, Simon de la Loubère (1642–1729) diplomático francés, escritor, matemático y poeta, sugirió un método para crear cuadrados de orden impar.

Veamos, por ejemplo, un cuadrado mágico de orden 5:

Empezamos con el 1 en la parte central, superior (ver figura más adelante).

Colocamos números consecutivos en forma diagonal, avanzando hacia arriba y hacia la derecha, pero apenas alcanzamos el borde superior, escribimos el número en esa misma columna hasta abajo y continuamos llenando en diagonal.

Cuando alcanzamos el borde derecho, los números se escriben en el mismo renglón pero en la parte izquierda.

Cuando llegamos a un cuadradito que está ocupado, el número que correspondía se escribe debajo del último número que habíamos escrito.

Por último, cuando llegamos a la esquina superior derecha, hacemos lo mismo que en el paso anterior.

			2		
		1	↓		
	5		↓		
4	←	←	↓	←	4
				3	
			2		

Si rotamos el cuadrado o lo reflejamos respecto a una recta que lo divida en dos por su parte central, podemos generar 7 cuadrados mágicos más. Si el 1 lo colocamos en cualquier otro cuadradito se generan cuadrados que suman lo mismo en los renglones y columnas, pero no necesariamente en la diagonal.

	18	25	2	9	
17	24	1	8	15	17
23	5	7	14	16	23
4	6	13	20	22	4
10	12	19	21	3	10
11	18	25	2	9	

Los cuadrados mágicos de orden impar son los más fáciles de construir. Existen muchos otros métodos para construirlos, aquí únicamente hemos descrito uno de ellos.

La próxima semana publicaremos algunos métodos para construir cuadrados mágicos de orden par sencillo y doblemente par.

# Construcción de los Cuadrados Mágicos (usando los métodos de Hire y Durero)

**Radmila Bulajich**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

La semana pasada (ver: [www.acmor.org.mx/descargas/09\\_sept\\_07\\_cuadrados.pdf](http://www.acmor.org.mx/descargas/09_sept_07_cuadrados.pdf)) publicamos una forma de construir cuadrados mágicos de orden impar. Primero recordemos qué es un cuadrado mágico. Un cuadrado mágico es un arreglo de  $N^2$  casillas, donde  $N$  representa un entero positivo mayor o igual a 3, en el cual en cada una de las casillas encontramos un número entero distinto. La palabra mágico se refiere a que la suma de los números en cada renglón, cada columna o en las dos diagonales principales, es la misma. Además, veamos a qué nos referimos cuando hablamos de cuadrados mágicos de ORDEN IMPAR, PAR SENCILLO y DOBLEMENTE PAR.

1. Cuadrados mágicos de ORDEN IMPAR, son los cuadrados mágicos donde  $N$  es un número impar, es decir, de la forma  $2m+1$ , donde  $m$  es un entero positivo.

2. Cuadrados mágicos de orden par, que llamamos PAR SENCILLO, donde  $N$  es de la forma  $2(2m+1)$ , donde  $m$  es un entero mayor o igual a 0, es decir, el doble de un número impar. Observemos que los números que generamos aquí son los números pares que son divisibles entre 2 pero no entre 4.

3. Cuadrados mágicos cuyo orden es doblemente par, que llamamos DOBLE PAR, donde  $N$  es de la forma  $2(2m)$ , para  $m$  un entero, es decir, el doble de un número par. El número de cuadraditos en cada uno de los lados de los cuadrados se pueden dividir entre 2 y 4.

Ahora describimos algunos métodos para construir cuadrados mágicos de orden par sencillo y doblemente par, los cuales fueron desarrollados por Phillippe Hire y por Alberto Durero.

## Método de Philippe Hire

El matemático francés Philippe Hire (1640-1719) creó el método para llenar cuadrados mágicos de orden par sencillo. Él hace uso de dos cuadrados, que llamaremos A y B, y al sumar el número de cada uno de los cuadraditos respectivos obtenemos el cuadrado mágico.

Veamos cómo construir un cuadrado mágico de orden 6. En el cuadrado A (de la FIGURA 1) llenamos la diagonal con los números del 1 al  $N=6$ , empezando por una diagonal en el cuadradito superior derecho y para la otra en el cuadradito inferior derecho, es decir, empezamos a llenar las diagonales iniciando en el lado derecho del cuadrado. Todos los cuadraditos que quedan vacíos en la primera columna se llenan con el

6 o su complemento (el número 1), como queramos. Aquí, la palabra complemento de un número se refiere al número  $N-x+1$ . Así, por ejemplo, el complemento del 6 es  $6-6+1=1$ , el complemento del 5 es el  $6-5+1=2$ . Lo que tenemos que cuidar es que siempre haya el mismo número de unos que de seises.

Ya que llenamos la primera columna, llenamos la sexta con el complemento de lo que tenemos en la primera. Para completar la segunda y quinta columna colocamos números 5 o su complemento (el 2) respetando la misma regla, y así sucesivamente.

Llenamos el cuadrado B (de la FIGURA 1) de forma análoga solamente que ahora los enteros que colocamos son 0,  $N$ ,  $2N$ ,  $3N, \dots, N(N-1)$ , donde  $N$  representa el número de renglones o columnas del cuadrado que estemos llenando, en este caso  $N=6$ . Llenamos las dos diagonales principales con estos números pero ahora iniciando en los extremos superior izquierdo y derecho, es decir, llenamos las diagonales iniciando en el lado superior del cuadrado. En los cuadraditos que quedan, acomodamos estos números utilizando las mismas reglas que para el cuadrado A, pero ahora iniciamos con el renglón superior e inferior. Luego, el segundo renglón y el penúltimo, y así sucesivamente.

Finalmente sumamos los cuadrados A y B para obtener el cuadrado mágico C (ver FIGURA 1). Observemos que aquí el número mágico es  $(1+2+\dots+36)/6=6(36+1)/2=111$ .

6	2	3	4	5	1
1	5	3	4	2	6
1	2	4	3	5	6
6	2	4	3	5	1
1	5	4	3	2	6
6	5	3	4	2	1

0	30	0	30	30	0
6	6	24	24	6	24
18	12	12	12	18	18
12	18	18	18	12	12
24	24	6	6	24	6
30	0	30	0	0	30

A

B

6	32	3	34	35	1
7	11	27	28	8	30
19	14	16	15	23	24
18	20	22	21	17	13
25	29	10	9	26	12
36	5	33	4	2	31

C

Figura 1.



Retrato de Philippe de la Hire



Pintura de Alberto Durero

El método de la Hire se puede utilizar para construir cuadrados que sean doblemente pares. Veamos (en la FIGURA 2) el ejemplo de un cuadrado mágico de 4X4.

4	2	3	1
1	3	2	4
1	3	2	4
4	2	3	1

A

0	12	12	0
8	4	4	8
4	8	8	4
12	0	0	12

B

4	14	15	1
9	7	6	12
5	11	10	8
16	2	3	13

C

Figura 2.

Algunos autores han utilizado variaciones de este método para llenar cuadrados de cualquier orden, pero para llenar cuadrados de orden impar se tiene que cambiar la forma de llenar los cuadrados A y B, ya que el método descrito antes no funciona para cuadrados de orden impar.

#### Método de Alberto Durero

El cuadrado mágico de Alberto Durero (ver: [www.acmor.org.mx/descargas/08\\_mar\\_24\\_durero.pdf](http://www.acmor.org.mx/descargas/08_mar_24_durero.pdf); [www.acmor.org.mx/descargas/08\\_mar\\_31\\_durero.pdf](http://www.acmor.org.mx/descargas/08_mar_31_durero.pdf)) se puede llenar utilizando el método (de Hire) que acabamos de describir. Sin embargo, no fue el que usó el autor. Alberto Durero creó su propio método para construir cuadrados mágicos doblemente pares.

Veamos cómo construir el cuadrado 4X4. Una variación de esta forma de llenar cuadrados funciona para cualquier cuadrado doblemente par. Colocamos el número 1 en el cuadradito inferior izquierdo (ver parte izquierda de la FIGURA 3). Ahora, imaginamos que vamos colocando los números consecutivos en el renglón inferior pero únicamente escribimos los números que ocupan un cuadradito de la diagonal. Así en el renglón inferior tendremos únicamente el 1

y el 4, estos pueden estar acomodados de izquierda a derecha o viceversa. Continuamos al siguiente renglón, de abajo hacia arriba, y podemos iniciar en el lado izquierdo o derecho del cuadrado, como queramos. Sin embargo, si en el primer renglón se hizo de izquierda a derecha en todos los subsecuentes se hará de la misma forma, es decir, de izquierda a derecha, hasta colocar el resto de los números. Por ejemplo, el primer número (de izquierda a derecha) del segundo renglón debería ser un 5 (que no escribimos) y el siguiente (que pertenece a la diagonal) es el 6, y así sucesivamente, hasta que lleguemos al renglón superior. El último cuadrado que llenamos tiene el número 16 en la esquina superior derecha.

Para terminar de construir el cuadrado mágico haremos lo mismo pero ahora iniciando en el último cuadrado que llenamos. En este caso, la esquina superior derecha con el número 1 (que no escribimos) y escribiendo únicamente los números que no pertenecen a la diagonal. Así colocamos el 2, junto al 16, el 5 junto al 11 y así sucesivamente, como se muestra en la parte derecha de la FIGURA 3.

<b>13</b>			<b>16</b>
	<b>10</b>	<b>11</b>	
	<b>6</b>	<b>7</b>	
<b>1</b>			<b>4</b>

<b>13</b>	3	2	<b>16</b>
8	<b>10</b>	<b>11</b>	5
12	<b>6</b>	<b>7</b>	9
<b>1</b>	15	14	<b>4</b>

Figura 3.

Una variación de este método se puede utilizar para llenar todos los cuadrados doblemente pares. Sin

embargo, el método no se aplica directamente, sino que hay que dividir el cuadrado en subcuadrados de 4X4 cuadraditos y marcar la diagonal de cada uno de estos subcuadrados, como se muestra a continuación (FIGURA 4):

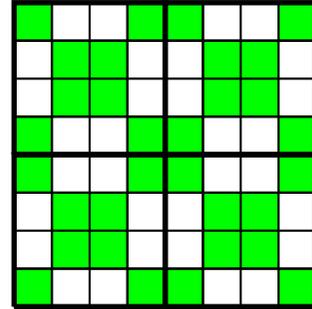


Figura 4.

Una vez hecho esto, se empiezan a distribuir los números igual que antes pero se escriben todos aquellos números que pertenezcan a alguna de las diagonales de un subcuadrado de 4X4 (los cuadraditos coloreados). Una vez que llegamos a una de las esquinas del cuadrado, iniciamos el proceso en sentido inverso, en ese mismo cuadrado, pero ahora llenando todos los cuadraditos que no pertenecen a ninguna de las diagonales de los subcuadrados de 4X4 cuadraditos. ¡Inténtalo en el cuadrado de 8X8!, el número mágico es:

$$260 = \frac{1 + 2 + \dots + 64}{8} = \frac{64 \cdot 65}{8}$$



# La proporción áurea o lo que tienen en común los pentágonos, el nautilus y la cría de conejos

## Primera parte

**Federico Vázquez**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

¿Quién no conoce el significado del número pi ( $\pi$ )? Digamos que el valor de pi (3.14159...) es la proporción de la circunferencia de cualquier círculo con relación a su diámetro. Esta definición pertenece al campo de la geometría pero el número pi aparece también, y frecuentemente, en el cálculo de probabilidades. A diferencia de pi, fi ( $\phi$ ) es otro número mucho menos conocido que pi, pero mucho más misterioso pues aparece en situaciones tan disímolas como lo pueden ser: la disposición de los pétalos de una rosa, las conchas espirales de los moluscos o la cría de los conejos. Fi ha recibido la atención de innumerables mentes matemáticas desde tiempos de la Grecia Antigua hasta nuestros días. Ha ejercido una gran fascinación no sólo en el mundo de las matemáticas sino que también entre los biólogos, los artistas, los músicos, los arquitectos y los psicólogos por su ubicuidad. Fue hasta el siglo XIX que fi recibió los nombres con los que se le conoce en la actualidad: “número áureo”, “proporción áurea” y “sección áurea”. Antes de pasar a la definición precisa de fi, recordemos que la palabra “proporción” se utiliza para definir la relación comparativa que existe entre las partes de un todo en referencia a su tamaño o bien a su cantidad. La palabra “proporción” se utiliza en frases de uso común como por ejemplo: “fulanita tiene un rostro bien proporcionado”, la cual significa simplemente que la relación que guardan la altura de su rostro y el ancho es agradable. Curiosamente, el rostro de una persona resulta más agradable cuanto la proporción de su alto a su ancho se acerca más a la proporción áurea. Es interesante mencionar que en general a la proporción áurea se le atribuyen cualidades armónicas que producen placer. Aquí es el lugar adecuado para decir que el valor de la proporción áurea es el número infinito e irrepetible 1.6180339887...

La primera definición precisa de fi (la proporción áurea) la realizó el fundador de la geometría, Euclides de Alejandría, más o menos en el año 300 a.C. La proporción áurea aparece en varios pasajes de su libro *Elementos*, que es considerado por muchos la obra cumbre de Euclides olvidando a veces que fue autor de al menos una docena de libros más de igual valía. Euclides definió una proporción obtenida al dividir un segmento de línea recta en lo que llamó su “media y extrema razón”. Se dice que un segmento está dividido en media y extrema razón cuando la

longitud del segmento completo es a la parte mayor como la parte mayor es a la menor. Obsérvese la figura 1. Lo anterior significa que la relación que existe entre las longitudes de los segmentos AC y CB es la misma que existe entre las longitudes de AB y AC. En otras palabras, si se realiza la división de las longitudes de los segmentos AB y AC resultará el número 1.6180339887..., lo mismo que si hacemos la de AC y CB.



Figura 1.

Esto último se puede representar por la ecuación:

$$\frac{AB}{AC} = \frac{AC}{CB}$$

Lo que hace tan atractiva a la proporción áurea (el número 1.6180339887...) es su inexplicable presencia en donde menos se le espera. Piense en una simple manzana por ejemplo. Córtaela por su circunferencia. Observará que las semillas están ordenadas formando una estrella de cinco puntas o pentagrama (figura 2).



Figura 2.

¿Dónde está  $\phi$ ? Resulta que cada uno de los triángulos isósceles que forman las esquinas del pentagrama tiene una propiedad sorprendente: la proporción de la longitud de su lado más largo (en realidad tiene dos de estos) con relación al más corto (que sería la base de los triángulos isósceles en la figura 2) es igual a 1.6180339887... ¡Con todas sus cifras decimales! Note que las puntas del pentagrama forman exactamente un pentágono. Pero he aquí que todo está relacionado. Imagine que trazamos dos diagonales adyacentes en el pentágono como se muestra en la figura 3a.



Figura 3a.

Observe que se forman tres triángulos isósceles, dos chaparritos y uno más esbelto. Es relativamente fácil demostrar que los ángulos internos de este último tienen las siguientes medidas  $36^\circ-72^\circ-72^\circ$ . Si se bi-secta uno de los ángulos de  $72^\circ$ , como en la figura 3b, se obtiene un triángulo menor DBC con los mismos ángulos! Es decir,  $36^\circ-72^\circ-72^\circ$ . Se puede mostrar que, según la definición de Euclides, el punto C (vea la figura 3b) divide al lado AB del triángulo en media y extrema razón! En consecuencia,  $AD/DB=1.6180339887...$  En otras palabras, en cualquier pentágono la proporción de la diagonal al lado es igual a  $\phi$ .

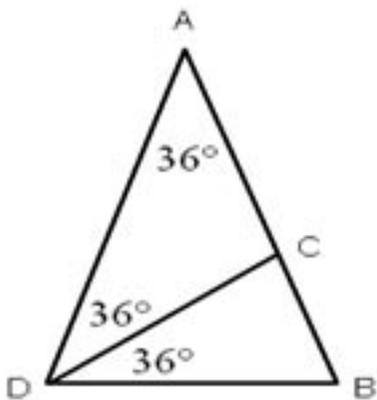


Figura 3b.

Una propiedad interesante de un rectángulo áureo (su largo dividido por su ancho es igual a la proporción áurea), que será retomada al final de este artículo, es que si se le superponen cuadrados en remolino como se muestra en la figura 4, los puntos que dividen los lados del rectángulo lo hacen en media y extrema razón.

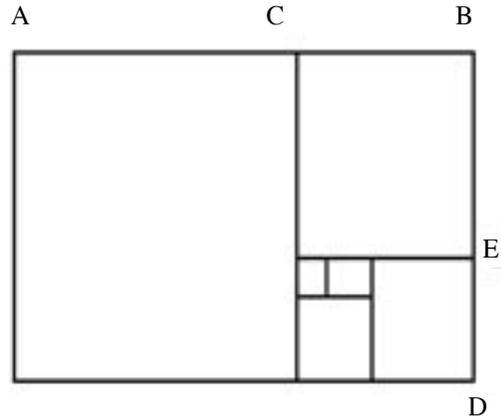


Figura 4

Es decir, y de acuerdo con la figura,

$$AB/AC=BD/BE=...=1.6180339887...$$

Huelga decir que el trazo de los cuadrados puede continuarse hasta el infinito.

Por cierto, y hasta aquí llegan las matemáticas en este pequeño artículo, se puede obtener el valor de  $\phi$  de la siguiente manera. Llame a la longitud mayor de un segmento dividido en media y extrema razón, con la letra  $\chi$  (vea la figura 1). Asigne a la longitud menor el valor de la unidad. Entonces, como el segmento está dividido en media y extrema razón debe cumplirse que:

$$\frac{\chi}{1} = \frac{\chi + 1}{\chi}$$

Multiplicando ambos lados de esta ecuación por  $\chi$ , obteniendo:

$$\chi^2 - \chi - 1 = 0$$

Las dos soluciones de esta ecuación son:

$$x_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}, x_2 = \frac{1 - \sqrt{5}}{2}.$$

El valor positivo da 1.6180339887... Es decir,  $\phi$ ! El valor negativo da el negativo del inverso de  $\phi$ .

$\phi$  tiene propiedades sorprendentes. Por ejemplo, introduzca en una calculadora de bolsillo el número 1.6180339887 y oprima la tecla ( $\{x^2\}$ ) ¿Nota usted

algo inesperado? Introduzca de nuevo el número pero oprima ahora la tecla ( $\{1/x\}$ ). Sorprendido? Mientras que el cuadrado de 1.6180339887 da 2.6180339887, el inverso o recíproco da 0.6180339887. Ambos con los mismos números inmediatamente después del punto hasta la décima posición. La proporción áurea tiene las propiedades únicas; sí, únicas; sí!, no hay otro número que las tenga, de que su cuadrado se obtiene sumándole 1 y su inverso restándole 1.

En la segunda parte de este relato continuaremos indagando la relación de la proporción áurea con otros fenómenos y situaciones que terminarán revelando y confirmando el misterioso y maravilloso contenido de ese número extraordinario.



# La proporción áurea o lo que tienen en común los pentágonos, el nautilus y la cría de conejos Segunda parte

**Federico Vázquez**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

En la primera parte de este relato empezamos a hablar acerca del intrigante número  $F_n$  mejor conocido como “número áureo”, “proporción áurea” o “sección áurea”. La proporción áurea aparece en situaciones tan inesperadas como por ejemplo: la disposición de los pétalos de una rosa, las conchas espirales de los moluscos o la cría de los conejos. Establecimos que la proporción áurea es el número infinito e irrepetible  $1.6180339887\dots$  y comentamos que fue Euclides de Alejandría, más o menos en el año 300 a.C, quien por primera vez dio una definición precisa de ella. Conocimos varias formas en el ámbito de la geometría y el álgebra por medio de las cuales  $F_n$  puede obtenerse.

Veamos ahora cómo se conecta la proporción áurea con la cría de conejos. Es en una forma un tanto sofisticada y para explicarla tenemos que hablar de Leonardo de Pisa. Leonardo de Pisa, que no es el Leonardo que ustedes piensan porque ese nació en Vinci, es mejor conocido como Leonardo Fibonacci. Este Leonardo nació en la década de los años 70 del siglo XII. Su padre, Guglielmo, fue un funcionario y hombre de negocios. El apodo Fibonacci proviene del latín *filius Bonacci*, hijo de la familia Bonacci o “hijo de buen corazón”. Las contribuciones directas de Fibonacci a la literatura de la proporción áurea aparecen en un pequeño libro sobre geometría de su propia autoría, publicado en 1223.

La aportación más emocionante de nuestro Leonardo a la proporción áurea proviene de un problema que está propuesto en el *Liber abaci*, otro libro suyo que fue el que le proporcionó realmente la fama de la que goza. El problema es el de los conejos. Este problema está planteado así en el capítulo XII del *Liber abaci*, así: Un hombre encerró a una pareja de conejos en un lugar rodeado por un muro por todas partes. ¿Cuántas parejas de conejos pueden producirse a partir del par original durante un año si consideramos que cada pareja engendra al mes una nueva pareja de conejos que se convierten en productivos al segundo mes de vida? Haga usted sus cuentas y verá que la comunidad “conejo” evoluciona como se muestra en la figura 5, en la que un conejo grande representa una pareja productiva y uno pequeño una pareja joven. Cada

hilera de conejos corresponde a un mes después que la inmediatamente anterior.

Observemos que el número de pares adultos a lo largo del tiempo (medido en meses, por supuesto) sigue la sucesión de números:

1,1,2,3,5,8,...

Puede comprobarse que el número de parejas jóvenes reproduce exactamente la misma sucesión, con la salvedad de que está desfasada por un mes:

0,1,1,2,3,5,8,...

Ahora, puede comprobarse fácilmente que en la sucesión de números 1,1,2,3,5,8,...., cualquiera de ellos, a partir del tercero, se puede obtener como la suma de los dos inmediatamente anteriores. Por ejemplo,  $5=3+2$ . Esta es una propiedad realmente sorprendente. En el siglo XIX, el matemático francés Edouard Lucas (1842-1891) bautizó la sucesión de números (escrita a continuación con unos pocos números más) 1,1,2,3,5,8,13,21,34,55,89,144,233,...., en la cual cada cifra (a partir de la tercera) se obtiene como la suma de las dos anteriores, como la sucesión de Fibonacci, en honor precisamente a Leonardo de Pisa.

Examinemos ahora otra sucesión de números obtenidos a partir de la sucesión de Fibonacci y encontraremos la conexión con la proporción áurea. Tal sucesión es la siguiente:

$$1/1=1.000000$$

$$2/1=2.000000$$

$$3/2=1.500000$$

$$5/3=1.666666$$

$$8/5=1.600000$$

$$13/8=1.625000$$

$$21/13=1.615385$$

$$34/21=1.619048$$

A estas alturas, el lector debe haberse dado cuenta que las proporciones de esta sucesión se han obtenido dividiendo cada número de la sucesión de Fibonacci entre el anterior. Cabe hacer notar que se ha suprimido

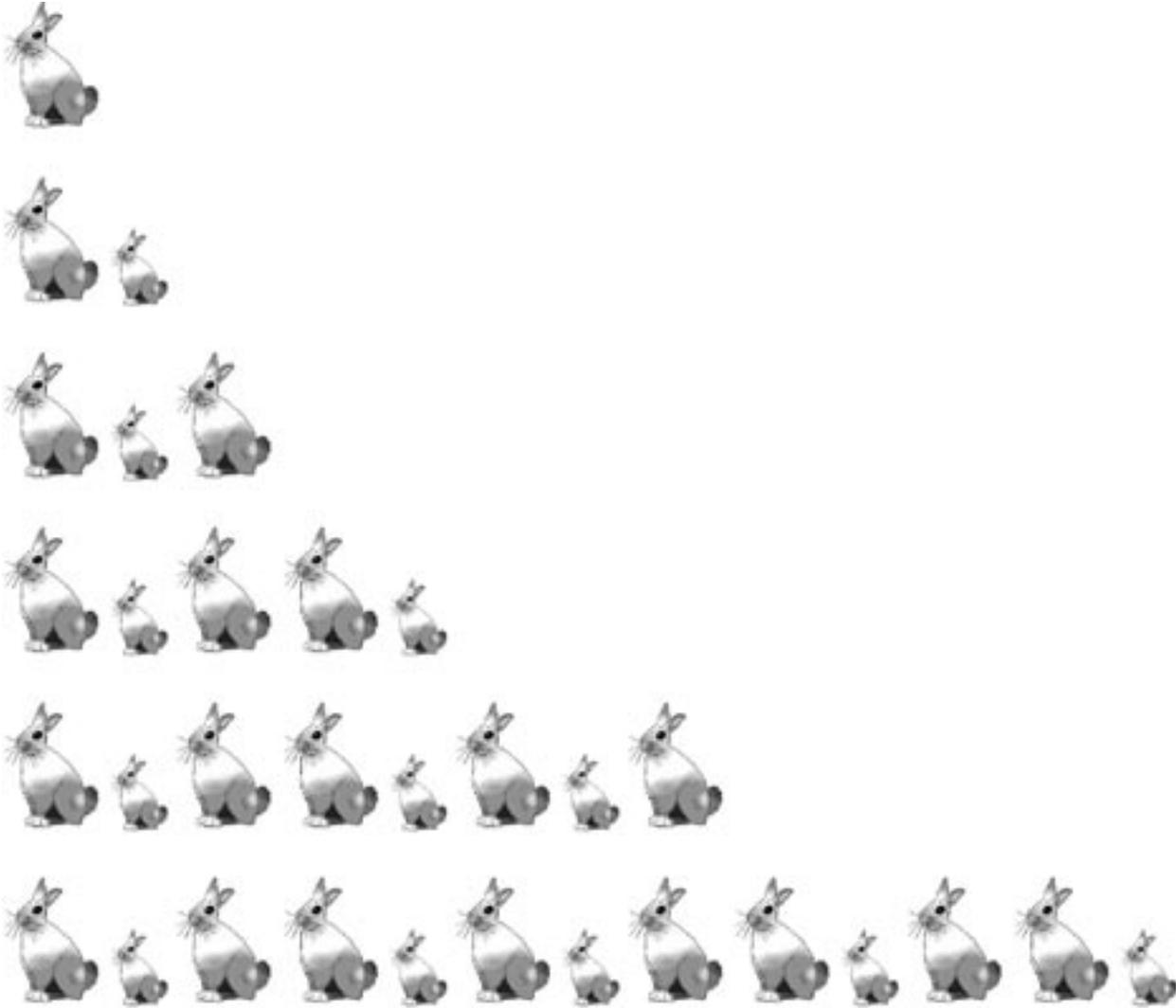


Figura 5.

la serie de decimales a partir de la séptima cifra. Escribamos unos pocos más y el resultado será intrigante sin duda.

$$55/34=1.617647$$

$$89/55=1.618182$$

$$144/89=1.617978$$

$$233/144=1.618056$$

$$377/233=1.618026$$

$$610/377=1.618037$$

$$987/610=1.618033$$

Observe el lector el último número de la sucesión (que por supuesto seguiría indefinidamente). ¿Lo reconoce? Sí, precisamente es la proporción áurea hasta la sexta cifra decimal! Si continuásemos calculando la sucesión de proporciones anterior, obtendríamos cada vez una mejor aproximación al valor de la proporción áurea.

Para terminar, hablemos del nautilus, un molusco de concha espiral. Pero para ello tendremos que remontarnos a la época de la familia Bernoulli. La familia Bernoulli produjo una cantidad de matemáticos célebres igual a ¡la friolera de 13! De ellos, tres sobresalieron sobre los demás: Jacques (1654-1705) y Jeanne (1667-1748), y el hijo de este último, Daniel (1700-1782). Además de sus extraordinarios logros matemáticos, la familia fue famosa por la profunda rivalidad intelectual que existió entre sus miembros. Tan sólo la solución a un conocido problema de física (la braquistocrona) y el derecho a su autoría, causó que Jeanne abandonara por muchos años la ciudad de Basilea (Suiza), lugar donde la familia residía. Jacques Bernoulli tuvo una relación muy estrecha con la proporción áurea debido a sus estudios sobre una curva conocida como la espiral logarítmica. Jacques escribió un tratado completo sobre esta curva a la que llamó *Spira Mirabilis* (espiral maravillosa). Fue tan significativa esta curva para él, que en su tumba está escrito un lema que establece una de sus

propiedades fundamentales: *Eadem mutato resurgo* (aunque transformado, resurjo de nuevo igual). Esta propiedad consiste en que su forma no se altera cuando se aumenta su tamaño. En el lenguaje moderno de la teoría de los fractales diríamos que la espiral logarítmica es auto-similar. Muchos fenómenos en la naturaleza tienen esta misma cualidad. Los girasoles, los remolinos, los huracanes, las conchas, las galaxias, etc. son sólo algunos ejemplos. Particularmente, a medida que crece la concha del nautilus (que precisamente tiene la forma de la espiral maravillosa, figura 7), cada incremento en su longitud va acompañado de un incremento proporcional en su radio de modo que su forma permanece inalterada.

La espiral logarítmica y la proporción áurea van tomadas de la mano. Si en un rectángulo áureo superpuesto con cuadrados como los de la figura 4 (ver primera parte de éste artículo), une usted los puntos sucesivos donde los cuadrados en remolino dividen los lados del rectángulo en proporciones áureas, obtendrá una espiral maravillosa como se muestra en la figura 6.

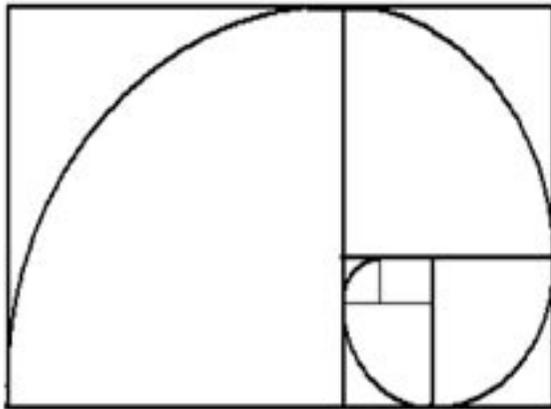


Figura 6.

Obsérvese que esta espiral se enrosca hacia adentro en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj. Piense el lector si es posible invertir la espiral, es decir, dibujar los cuadrados de modo que la espiral se enrosque hacia dentro en sentido inverso a las manecillas del reloj.

Tres comentarios finales. Uno, existe otro tipo de espiral conocida como espiral de Arquímedes, la cual recibe su nombre del famoso matemático griego (287-212 a.C.), quien la describió concienzudamente en su libro sobre las espirales. Para dar una idea de la forma de la espiral de Arquímedes, pensemos en una cuerda enrollada en el suelo (la distancia entre los anillos sucesivos es siempre la misma). Como consecuencia de un error que haría que Jacques Bernoulli saltara de su tumba si se enterara, el cantero que realizó la inscripción, grabó una espiral de Arquímedes en lugar de una *Spira Mirabilis*.

Dos, la proporción áurea ha continuado obsesionando la mente de muchas personas hasta nuestros días. Ella representa una de las aventuras más



Figura 7.

largas, fecundas, fascinantes y misteriosas del intelecto humano.

Tres, haciendo referencia al título de este artículo, ¿qué tienen en común los pentágonos, el nautilus y la cría de conejos?, debemos contestar: ¡La proporción áurea!

Algunas lecturas sobre el tema tratado en este artículo son las siguientes:

"[http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_%C3%A1ureo](http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_%C3%A1ureo)" [http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_%C3%A1ureo](http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_%C3%A1ureo)  
 HYPERLINK "<http://www.pauloporta.com/Fotografia/Artigos/epropaurea1.htm>" <http://www.pauloporta.com/Fotografia/Artigos/epropaurea1.htm>

Livio, M., La proporción áurea: La historia de phi, el número más sorprendente del mundo, Ariel, Barcelona, 2006.

Este lugar es muy ameno:  
 "[http://www.castor.es/numero\\_phi.html](http://www.castor.es/numero_phi.html)" [http://www.castor.es/numero\\_phi.html](http://www.castor.es/numero_phi.html)

Se puede encontrar la relación de la ley de Bedford con la sucesión de Fibonacci en:  
 "<http://www.goldenratio.com.ar/>" <http://www.goldenratio.com.ar/>

La ley de Bedford fue muy socorrida en el análisis de los resultados de las memorables elecciones mexicanas de 2006.

A los que les gustan las matemáticas computacionales vean:  
 "[http://matematicas.ingenieria.googlepages.com/sucesiones\\_aureas](http://matematicas.ingenieria.googlepages.com/sucesiones_aureas)" [http://matematicas.ingenieria.googlepages.com/sucesiones\\_aureas](http://matematicas.ingenieria.googlepages.com/sucesiones_aureas)



# ¿Qué rayos significa medir? y ¿porqué las unidades son tal como son? Primera parte

**Markus Müller**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

## El proceso de medición

Medir es una acción que se hace continuamente en la vida cotidiana. Nuestros sentidos son detectores capaces de medir una cantidad química, como la composición del olor de un rico mole poblano o de una cantidad física como la longitud y el peso. La facilidad de detectar propiedades de nuestro entorno y evaluar los resultados de la percepción es una aptitud sumamente importante para todos los seres vivos. Así, el proceso de medición ha ido evolucionando impresionantemente durante la evolución y encontró su máxima expresión de complejidad y exactitud cuando la especie *homo sapiens* apareció en la Tierra; es decir, cuando inició el desarrollo científico y tecnológico. Por ello, la introducción de un sistema universal de unidades fue fundamental para poder cuantificar objetos y/o fenómenos. Pero ¿qué significa medir? y cuando alguien mide, ¿qué es lo que hace? y ¿porqué el sistema de unidades es tal como lo conocemos, es decir, ¿por qué se divide el día en 24 horas y no en 25?; ¿por qué la unidad de 1 metro o 1 kilogramo es conveniente?; ¿sería grave si cambiásemos la definición de un kilogramo por lo que conocemos en el sistema actual por algo equivalente a 950 gramos? En dos ensayos se tratará de encontrar respuestas a estas preguntas.

Cuando un mono *mide* la distancia a una rama lejana, compara la distancia a la que se encuentra ésta con distancias que, según él, logra saltar. A través de la comparación el mono obtiene una imagen más precisa para tomar la decisión que si se puede alcanzarla con un salto o no. Crucial en este proceso es el momento de comparación. Se puede decir que medir significa, cuantificar la magnitud desconocida de una cantidad al compararlo con algo conocido. Esto podría ser un simple recuerdo, un umbral interno de una célula, como por ejemplo el valor crítico del estímulo de una neurona para generar un potencial de acción o, por supuesto, la escala de un termómetro para medir la fiebre. La cantidad conocida que se usa para esta comparación la llamamos *la unidad*. ¿Pero qué requisitos debe de cumplir la definición de una unidad, sobre todo cuando se habla de aplicaciones científicas?

Hasta la Edad Media no existía un sistema de unidades reconocido de manera general en todo el mundo, ni siquiera dentro de un país. Por ejemplo, un *Estéreo* de madera (brazo) en Alemania no necesariamente era la misma cantidad de madera que

en Francia. Un *Pie* en Escocia era muy distinto que un *Pie* en Inglaterra y un sastre en un pueblo cerca de Londres usaba una unidad de longitud para medir la tela diferente a la empleada por el sastre del pueblo vecino. Debido al hecho de que la infraestructura en aquellos tiempos era limitada, y que por ello comunidades lejanas no pudieron comunicarse en cortas escalas de tiempo, tampoco existía la necesidad, ni la posibilidad, de establecer un sistema de unidades global, es decir a escala mundial. Por esta razón apareció en la historia de la humanidad una gran variedad de unidades con diferentes nombres y definiciones.

Pero el hecho, que éstas fueron unidades locales, reconocidas solamente en una región pequeña, no es el problema fundamental. Si Henry I de Inglaterra definió la longitud de una *yarda* en el año 1120 a través de la longitud de su brazo o el rey David de Escocia definió una *pulgada* en 1150 a través de la anchura de un pulgar de un hombre promedio, la definición no era ni precisa, ni objetiva. ¿Quién sabe qué tan largo era el brazo del rey o que tan ancho es el pulgar de un hombre promedio? Además, la longitud del brazo puede modificarse debido a la edad o por una lesión y el promedio de la anchura de los pulgares puede depender de la localidad elegida y la forma en la que se selecciona la muestra de hombres para medir su pulgar. ¿Para todas las aplicaciones científicas es necesario contar con definiciones de unidades que no dependan del tiempo y que sean objetivas, es decir unidades que cualquier persona del mundo pueda verificar obteniendo el mismo resultado!

¿Y eso es todo lo que se requiere para definir una unidad? ¡No! Aún falta discutir un aspecto importante: la magnitud de la unidad.

Lo que percibimos fácilmente son conjuntos pequeños de objetos. Es decir, con sola una mirada rápida distinguimos entre un conjunto de 3 y de 4 dulces. Si el número de dulces es 9 nos causaría más dificultades notar si alguien nos robó uno. El problema se vuelve imposible de resolver, a través de un solo vistazo si el número de dulces es 23 ó 57. Sabemos intuitivamente lo que significa un ramo de 5 o quizá de 10 rosas rojas, pero ¿podemos imaginar *precisamente* un ramo de 163 o de 432,854,945 rosas? La respuesta es no. Nuestro cerebro permite imaginar solamente números que son considerablemente pequeños. La exactitud de la percepción decae rápidamente cuando el número de objetos aumenta. Por esta razón se



necesitan unidades de diferentes tamaños para evitar números grandes o muy pequeños como resultado de la medición.

De estas consideraciones se puede resumir que:

- i. La comparación es una acción básica de la medida, que realizan los seres vivos permanentemente.
  - ii. La unidad científica debe ser constante en el tiempo, libre de influencias externas y ser reconocida en todas partes del mundo.
  - iii. El tamaño de la unidad deber ser del mismo orden de magnitud que lo que se desea medir
- ¿Y cómo se encontraron las definiciones de las unidades como el metro, el segundo o el kilogramo?  
Veamos en el metro.

#### **La dolorosa búsqueda del metro**

Los experimentos modernos que realizan hoy en día los científicos en todo el mundo requieren una tecnología de más alta precisión. Por ello es indispensable que sobre todo las unidades de las cantidades físicas en cuestión sean bien definidas y precisas. En vista de esos requerimientos estrictos parece ser una ironía de la vida que, como veremos en este artículo, una de las unidades básicas, el metro,

está basada en un error de medición.

Ya en los tiempos de los griegos se sabía que la Tierra no es un disco plano sino tiene una forma redonda, aunque este conocimiento cayó posteriormente en el olvido. Fue Aristóteles (384-323 a.C.) quién declaró por primera vez que la Tierra tenía la forma de una esfera. Esto lo propuso a partir de la mancha oscura que se ve en los eclipses de la Luna y que identificó como la sombra de la Tierra. Debido al hecho de que independientemente del momento en que se observe este fenómeno la sombra tiene la forma de un círculo, por lo cual llegó a la conclusión de que su forma era esférica. Una primera estimación de la circunferencia la realizó Eratóstenes de Cyro ((276 – 195 a.C.) en el año 240 a. C. Él usó el hecho que en el medio día del 21 de junio (fecha del solsticio de verano) un objeto colocado verticalmente en la ciudad de Syena (Asuan) no producía ninguna sombra, mientras que en la misma fecha y hora, un obelisco en Alejandría, una ciudad 5000 *estadios* (aproximadamente 820 km) más al sur, producía una sombra que era justamente la fracción  $1/50$  de la altura del obelisco. Así, él estimó la circunferencia de la Tierra como  $50 \times 5000$  *estadios* = 250,000 *estadios*, una longitud que corresponde

aproximadamente 41,000 *km*. Ahora sabemos que el error de su experimento fue de tan sólo el 2.5%.

Mucho después, en una reunión de científicos realizada en París el 26 de marzo de 1791, la definición oficial del metro estableció que éste fuera justamente la diezmillonésima parte de un cuarto del meridiano que atraviesa París. Dos astrónomos, Jean-Baptiste-Joseph Delambre y Pierre-François-André Méchain, se hicieron responsables de calcular la longitud del meridiano midiendo la distancia entre Dunquerque y Barcelona. Durante años, ellos se dedicaron a medir minuciosamente ángulos de pendientes, alturas de montañas y profundidades de barrancas y estimaron lo más preciso posible anchuras de ríos y dimensiones de valles. Aparte de estos trabajos laboriosos, ellos sufrieron los peligros de la revolución francesa, de manera tal que Méchain fue temporalmente encarcelado (y considerado merecedor de la pena de muerte) por ser sospechoso de espionaje. A pesar de todas estas dificultades, Delambre y Méchain llegaron finalmente a la conclusión de que el meridiano medía 40,000 *km*. En base a ese resultado se construyó el primer *metro patrón* el 7 de abril del 1795. Ese metro patrón, una barra fabricado de platino, se depositó en una caja fuerte en el Archivo Nacional de la República Francesa el 22 de junio de 1799. Posteriormente existieron numerosos debates en otros países que tenían como propósito aclarar si el sistema métrico propuesto por los franceses, era neutral o era específicamente francés. ¿Era natural o era histórico?; ¿derivaba realmente del tamaño de la Tierra o de una barra de platino que podía ser corrompida?

Aproximadamente cuarenta años después, ese ambiente de desconfianza fue atizado por la observación de que los extremos de la barra estaban rayados. Además se encontró que, contrario a lo que se pensaba, no era platino puro sino una mezcla de platino e iridio. Por todo ello se acordó forjar una nueva barra que reprodujera la definición adoptada en 1791 y que ésta fuera depositada en una oficina internacional para que ninguna nación pudiera aprovecharse de ésta. Esa barra de metro patrón provee una exactitud de  $10^{-7}m$ , exactitud muy notable para aquel tiempo.

Algunos años más tarde, la definición del metro patrón sufrió otro golpe. Una revisión del trabajo

de Delambre y Méchain condujo a reconocer que la verdadera longitud del meridiano es 40,009 *km*. Esto conduciría a que el metro patrón resultase ser 0.2 mm más corto que lo que la definición requería. Sin embargo, se utilizó el dato original de Delambre y Méchain para construir el nuevo metro patrón.

Con el tiempo, las demandas de la comunidad científica y de ingenieros fueron más estrictas y surgió la necesidad de una medida más precisa. El problema principal fue que la extensión de los materiales, y por lo tanto la longitud del metro patrón, depende de la temperatura. Por esta razón una comisión internacional de especialistas estableció en 1960 la unidad de la longitud basándose en la longitud de onda de la radiación de una transición específica del núcleo del átomo de  $Kr^{86}$ . Según esta definición un metro equivale a 1,650,763.73 longitudes de onda de esta radiación. Luego, con la evolución de la tecnología de relojes atómicos resultó que la medición de intervalos de tiempo se puede realizar con una mejor precisión que la medición de longitudes de onda. Esto motivó a realizar otro cambio de la definición del metro en 1983. Desde entonces su definición es la distancia que recorre la luz en el vacío en  $1/299,792,458$  segundos con lo que es posible alcanzar una exactitud de  $10^{-10}$  a  $10^{-11}m$ . Curiosamente, tanto esta convención como la de 1960 conservan la longitud original del metro de Delambre y Méchain de 1799.

¿Estos números no parecen ser arbitrarios? La definición original de un metro como una fracción pequeña de la circunferencia de un meridiano *sin* conocer la longitud del mismo sí refleja una cierta arbitrariedad. Pero el hecho de que la base de todas las mediciones de longitud, la definición actual del metro, esté basada en una medida con un (pequeño) error de medición, subraya que esta definición es en cierta forma un accidente histórico. Los únicos objetivos fueron: (a) tener un marco de referencia absoluto y (b) escoger una fracción del meridiano que provea una unidad del mismo orden de magnitud que la altura de un hombre. Éstos objetivos se lograron, con o sin un error de medición.

En la parte 2 de esta serie hablaremos de la hora y del kilogramo.



# ¿Qué rayos significa medir? y ¿porqué las unidades son tal como son? Segunda parte

**Markus Müller**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

## **El minuto, la hora y la antigua cultura de Babilonia**

El tiempo es una cantidad más abstracta que, por ejemplo, la longitud o la masa porque al tiempo no se le puede percibir directamente a través de nuestros sentidos. Una masa se puede tocar y levantar para sentir su peso y una longitud se mide ajustando una regla con las manos o a través de caminar una cierta distancia. El tiempo a su vez fluye continuamente y cuando ha pasado no podemos regresar para volver a medirlo como, por ejemplo, volver a poner una masa en una balanza. El tiempo está presente en cada momento, pero un instante después éste momento huyó irrecuperablemente al pasado.

Sólo la duración de ciertos procesos como el periodo de respiración o del latido cardiaco puede dar una vaga idea sobre el significado de un intervalo de tiempo. Así, cualquier proceso periódico sirve para definir una unidad de tiempo cuando la duración del periodo es constante. Por lo tanto, diferentes tipos de péndulos proveen de manera natural una forma de contar el número de unidades básicas que tarda un cierto proceso. En principio, también eventos que suceden sólo una vez, como el intervalo de tiempo que necesita una cierta cantidad de arena para caer a través de una pequeña abertura, se podría usar para definir una unidad. Pero para estos fines, los osciladores resultan ser más prácticos. Seguir los “clics” de un metrónomo con un “uno, dos, tres,...” es mucho más fácil y preciso que estarle dando la vuelta continuamente a un reloj de arena.

En este contexto, la periodicidad de los fenómenos que se observan en el cielo jugó un papel importante, en particular la periodicidad del aparente movimiento del Sol. Esta periodicidad se observó en todas las culturas y la unidad de tiempo de distintos calendarios estuvo basada en ello y no es sorprendente que la primera definición de unidades de tiempo, el minuto y la hora, también se haya basado en el movimiento solar.

La definición del minuto como la  $24 \times 60 = 240$ -ésima parte de un día, tiene su origen en la antigua Babilonia (ahora Irak). En aquel tiempo no se usaban el sistema decimal para el conteo sino el número 12 presentaba la base y aún más, los números 12 y 60 eran considerados como números sagrados. La razón de ello se encuentra en las matemáticas. El número 12 se puede dividir (sin generar fracciones) entre 1, 2, 3, 4 y 6 mientras que el diez sólo se puede dividir entre 1, 2 y 5. El número 60 es divisible entre 1, 2,

3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20 y 30 mientras 100 sólo se puede dividir entre 1, 2, 4, 5, 10, 20, 25 y 50. Así, se dividieron la fase iluminada y la fase nocturna del día en 12 partes iguales lo que resulta en 24 horas. Cada hora, a su vez se dividió en 60 partes, los minutos. La definición del segundo como la 60-ésima parte de un minuto apareció mucho después debido al hecho que en aquel tiempo no hubo la necesidad de medirlo, ni la tecnología para hacerlo, de manera precisa.

Pero el periodo de iluminación varía con las estaciones, sobre todo si lo medimos en lugares más cercanos a los polos. Para evitar esta variación, se usa, en vez del Sol, una estrella mucho más lejana para medir el periodo de un día. En un momento durante una noche se marca la posición de una estrella lejana en un sistema de coordenadas. Luego se mide el periodo, el día estelar, que tarda esta estrella en encontrarse en la misma posición que se ha marcado en la noche anterior. Resulta que el día estelar es por un factor 1/365.256 más corto que el promedio del día solar (tomado sobre un año) porque esto es la fracción de avance de la Tierra en su camino alrededor del Sol.

Sin embargo, independientemente de cual de las dos definiciones de día se usa, sobreviene el problema de que ¡la rotación de la Tierra alrededor de su eje no es constante! Debido a la fricción del movimiento de la marea, la velocidad angular de la rotación de la Tierra disminuye continuamente y por lo tanto el periodo de rotación de un día aumenta. Como para todos los fines científicos (y tecnológicos) la variación temporal de la magnitud de una unidad, o la dependencia de factores externos es intolerable, se buscó un oscilador diferente para la definición de un segundo. Los péndulos tienen la deficiencia de que su tiempo de periodo está determinado a través de la constante de gravitación  $g$ , que a su vez varía ligeramente con la altura sobre la superficie del mar. Más convenientes parecen ser los cuarzos. La rapidez de sus vibraciones está bien definida a través de la red atómica, pero varía ligeramente con el número de impurezas, un factor que difícilmente se puede controlar, aunque los mejores relojes de cuarzo son aún más precisos que los primeros relojes atómicos.

Así como en el caso de la definición del metro, la definición moderna de un segundo se basa en un sistema atómico. En el año 1964 se usaba la frecuencia de la luz emitida por una transición hiper-fina de un átomo del elemento  $\text{Cs}^{133}$  porque resulta que esta transición es casi independiente de las fluctuaciones del campo magnético terrestre y por lo tanto es casi



independiente del lugar. El principio de este método es que se usa un generador de ondas electromagnéticas como un marcapaso para ajustar un reloj (atómico), mientras que la frecuencia del generador se ajusta continuamente por la absorción en Cs. La exactitud de estos relojes es superior a  $10^{-13}$  s. De esta manera, la definición de un segundo es el periodo de tiempo que necesita la onda electromagnética para realizar 9,192,632,770 oscilaciones.

El hecho que los números 12 y 60 eran números sagrados en Babilonia provocó la división de una hora en 60 minutos y un minuto en 60 segundos. ¿No parece esto ser un accidente histórico? ¿Qué hubiera sucedido si en la antigua Babilonia en vez del número 12 el número primo 11 fuera un número sagrado? En ese caso es probable que nuestro sistema de reloj y por lo tanto la definición de un segundo fuera diferente.

#### **El kilogramo, la cantidad indefinida.**

Si revisamos los libros de texto de preparatoria se lee que la masa de un kilogramo se definió originalmente como el equivalente de la masa de un litro de agua a una temperatura de  $4^{\circ}\text{C}$ . En este caso, la información adicional sobre la temperatura es importante ya que la densidad de toda la materia

depende de ésta. A  $4^{\circ}\text{C}$  la densidad del agua alcanza su valor máximo. Resulta interesante notar que esta es la única unidad básica cuya definición se hace a partir de un múltiplo (1000) de una sub-unidad más pequeña: el gramo. Esto es debido a que es más cercano a la percepción humana el volumen de 1 litro de agua que el de 1 ml de esta.

En 1889 se construyó una masa equivalente a través de una aleación de platino (90%) e iridio (10%) en forma de un cilindro con una altura de 39 mm y un diámetro de 39 mm y se produjeron varias copias de este *kilogramo patrón* para distribuirlas a todos los países interesados. De esta manera la definición de un kilogramo ya no depende de la temperatura del ambiente, y, contrario a lo que ocurre con el metro patrón, este cilindro depositado en París sirve *hasta la fecha!* para definir “la unidad” de la masa, el kilogramo.

Esto condujo a una problemática muy seria. A lo largo del tiempo se dieron cuenta que la unidad original, es decir el *kilogramo patrón* depositado en París, perdió masa en comparación con sus réplicas. La pérdida estimada es de 50 microgramos, es decir 0.000,000,05 kg (cinco cienmilésimas de gramo). La razón por la cual el cilindro de metal en París perdió esta cantidad de masa en contraste con sus

copias, es completamente desconocida, sin embargo, las sospechas llegan hasta creer que se realizaron trabajos de limpieza de manera exagerada. Aunque esta pérdida parece ser despreciable, no es posible tolerar que la magnitud real de la unidad básica se modifique a través del tiempo.

Por eso existe un consenso internacional relativo a la necesidad de establecer una mejor definición de esta cantidad que evite los problemas que se han identificado. Por lo tanto, existen actualmente (2008) dos proyectos sumamente costosos en el mundo (en los cuales participan casi todos los países industriales) para encontrar una definición conveniente de un kilogramo que cumpla con todos los requerimientos estrictos que impone la comunidad de los científicos.

En el primer proyecto se trata de fabricar una esfera de silicio puro con la masa equivalente a un kilogramo. El objetivo es “contar” el número de átomos de la esfera. Para lograr eso, se mide el diámetro de la esfera con un láser escaneando su superficie y con una técnica que utiliza rayos X se mide el espacio que ocupa cada uno de sus átomos. Una primera variante ya se ha fabricado pero la verdadera masa de esta esfera no resultó igual que la masa calculada. La razón es probablemente que el silicio usado contiene una gran variedad de isótopos de este elemento. Cada átomo en el universo consiste de un cierto número de partículas minúsculas llamadas protones, neutrones y electrones. Las propiedades químicas de los elementos tales como el hidrógeno, carbono o uranio están esencialmente definidas por el número de sus protones. Es decir, aquellos átomos que tengan el mismo número de protones pero un número diferente de neutrones aún pertenecen al mismo elemento, es decir son isótopos del elemento. Por ejemplo, el átomo de carbono  $^{12}\text{C}$  tiene 6 protones, 6 electrones y 6 neutrones. Pero un átomo con 6 protones, 6 electrones y 7 neutrones también es carbono, es decir, se trata del isótopo de carbono  $^{13}\text{C}$ . Como el isótopo  $^{13}\text{C}$  contiene 1 neutrón más que el carbono

$^{12}\text{C}$ , éste isótopo es ligeramente más pesado. Así, la fabricación de una nueva esfera de silicio (casi isotópicamente pura, es decir, con una menor cantidad de diferentes isótopos, está en proceso.

Como la unidad de tiempo es actualmente la unidad más precisa que se ha logrado definir, el segundo proyecto intenta transferir la medición directa del peso a una medición indirecta del tiempo. La idea principal es la de comparar la potencia eléctrica que se gasta para levantar un peso con la potencia mecánica. Aunque esta técnica parece ser más elegante e ingeniosa que el primer proyecto, también este método tiene una desventaja crucial: las fluctuaciones del campo electromagnético del ambiente tienen una influencia demasiado importante para alcanzar la exactitud requerida. Los aparatos construidos en diferentes países proporcionan resultados tan diferentes que sus medidas aún no se pueden aceptar para realizar una nueva definición del kilogramo. Con suerte, es decir si los dos proyectos se desarrollan de la manera planeada, se espera que se obtengan resultados positivos en algún momento durante la siguiente década.

El desarrollo científico y tecnológico llevó a la humanidad a resultados impresionantes. Mandamos satélites hacia fuera del sistema solar y con los mejores telescopios se puede “ver” hasta casi las esperadas fronteras del universo; se estiman las masas gigantescas como las de los hoyos negros e investigan propiedades de partículas elementales como las de los neutrinos que tienen una masa menor a 0.000,000,000,000,000,1 kg (si tienen masa alguna), se construyen circuitos eléctricos con millones de elementos electrónicos en un espacio menor que la uña de nuestro meñique y los biólogos declaran que ya han descifrado el código genético. Parece que la humanidad está cerca de entender los últimos secretos de la naturaleza y controlar toda la vida en este planeta. Sin embargo, todavía estamos detenidos con el problema más básico de todas las ciencias naturales: ¡la búsqueda de las unidades perfectas!



# La confusión en la eficiencia de los motores automotrices y el razonamiento matemático

**Antonio Sarmiento Galán**

Instituto de Matemáticas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.



**RENDIMIENTO** *Con el uso de las Matemáticas se puede mostrar que se requiere de información más precisa que la actual para tomar decisiones.*

Siempre que se habla de la eficiencia en el consumo de combustible de un vehículo, se dice que un auto es más eficiente que otro si con la misma cantidad de gasolina para ambos, se pueden recorrer más kilómetros con el primero de ellos. Se utiliza entonces el número de kilómetros por litro (Km/L) para describir la eficiencia de los autos.

Esta forma de expresar el rendimiento de un vehículo no es siempre la adecuada para tomar la decisión correcta, sobre todo cuando se trata de la compra de un auto para substituir a otro.

Pongamos un ejemplo: ¿En cuál de los dos casos siguientes se logra la mayor reducción de

emisiones? (A) El cambio de una vieja camioneta que anda 10 Km/L por una nueva que rinde 16 Km/L, o (B) La substitución de un coche que rinde 25 Km/L por otro (híbrido) que recorre 40 Km/L. Descontemos las emisiones de fabricación en ambos casos y supongamos que tanto los hábitos de conducción, como la distancia que se recorre, son los mismos.

La respuesta correcta y sorprendente para quienes no lo pensaron, es A. Veamos la sencillez del razonamiento. Suponiendo que la distancia recorrida es de 100 Km, entonces tenemos que para el caso A se ahorra una cantidad de combustible (y por lo tanto de

emisiones) igual a:  $100 \text{ Km}/(10 \text{ Km/L}) - 100 \text{ Km}/(16 \text{ Km/L}) = 10 \text{ L} - 6.25 \text{ L} = 3.75 \text{ L}$ ; mientras que para el caso B, el ahorro es solamente de:  $100 \text{ Km}/(25 \text{ Km/L}) - 100 \text{ Km}/(40 \text{ Km/L}) = 4 \text{ L} - 2.5 \text{ L} = 1.5 \text{ L}$ .

El error de juicio se origina en el hecho de que a la gente le gusta pensar linealmente cuando de números se trata y por lo tanto, se supone que un cambio en Km/L provoca un cambio similar en el consumo de combustible. Éste, sin embargo, no es el caso –las mejoras en eficiencia en la parte baja de la escala resultan mucho más útiles cuando se trata de ahorrar combustible o equivalentemente, de reducir las emisiones. De hecho, éste es un punto casi general –cuando tenemos que aumentar la eficiencia de algún proceso, siempre es aconsejable empezar con la parte menos eficiente del mismo.

En otros países, donde los fabricantes no controlan el mercado, las autoridades exigen que los fabricantes cumplan en la práctica con la obligación de proporcionar la información en una manera que la relación de ésta sea lineal con el ahorro de combustible, es decir, algo así como el número de litros que se consumen en una distancia dada; el estándar en Europa es litros por cada 100 Km (L/100Km). El ejemplo, reescrito en estos términos, queda como sigue: (A) Cambiar la camioneta vieja que gasta 10 L/100 Km por una que consume 6.25 L/100 Km, o (B) Cambiar el coche que gasta 4 L/100 Km por el híbrido que gasta 2.5 L/100 Km. De esta manera la respuesta correcta se logra por un camino mucho más sencillo.

El ejemplo anterior se refiere exclusivamente a las

substituciones indicadas. En cuanto a la eficiencia de cada vehículo, tenemos que el orden de los mismos en cuanto a eficiencia individual, es decir, yendo del consumo menor de combustible (mayor ahorro de emisiones) hacia el dispendio (contaminación irresponsable), será siempre: el híbrido, el coche viejo, la camioneta y la camioneta vieja, durante toda su vida útil.

Y la forma de llegar a tal orden, también se facilita con la nueva forma de proporcionar la información: en este caso, sólo basta multiplicar los litros que se consumen cada 10 kilómetros por la vida útil del vehículo, digamos 150,000 Km., para obtener que el consumo total del híbrido será el menor,  $(2.5 \text{ L}/100 \text{ Km})(150,000 \text{ Km}) = 3,750 \text{ L}$ ; seguido del auto viejo,  $(4 \text{ L}/100 \text{ Km})(150,000 \text{ Km}) = 6,000 \text{ L}$ ; de la camioneta nueva,  $(6.25 \text{ L}/100 \text{ Km})(150,000 \text{ Km}) = 9,375 \text{ L}$  y la camioneta vieja,  $(10 \text{ L}/100 \text{ Km})(150,000 \text{ Km}) = 15,000 \text{ L}$ .

En la actualidad, habiéndose identificado sin duda a varios gases como los causantes del Calentamiento Global y destacando entre ellos los emitidos por los motores automotrices, debemos considerar muy seriamente el seguir emitiéndolos sin justificación alguna. No sólo debemos conservar el petróleo para producir objetos realmente útiles, como prótesis médicas, sino que debemos ser muy rígidos con quienes se desplazan en vehículos que consumen combustible de manera desmedida e innecesaria y considerarlos a la luz de las consecuencias globales como verdaderos irresponsables.



un factor de escala (que decrece exponencialmente con el tiempo)? La pregunta es crucial porque nos lleva a la solución general del problema –siempre y cuando las condiciones iniciales puedan ser descritas como suma de estas soluciones particulares– como lo demostró Fourier. Este conjunto de perfiles invariantes de temperatura son las funciones sinusoidales –imaginémosnos una lámina acanalada–matemáticamente definidas por el seno y coseno trigonométricos. En su *Mémoire*, Fourier plantea su fórmula general en la tercera página y dedica las siguientes 28 a explicar su construcción; con esto dio inicio a una rama mayor de las matemáticas contemporáneas. Su método de análisis aplica no sólo a la difusión del calor, sino a la propagación de disturbios en medios elásticos, las ondas electromagnéticas entre ellas; explica la naturaleza ondulatoria de la mecánica cuántica demostrando la necesidad matemática del principio de incertidumbre. La teoría amplía el tratamiento de señales exponiendo su *espectro de frecuencias* –radio FM en vez de AM– el cual es patrón de todas las redes de comunicación –incluso digitales. En astronomía, dota a la imagen puntual de una estrella con su espectro de colores, el cual revela su composición química, su movimiento sobre la línea de observación, y permite reconocer sistemas binarios o soles con planetas. El análisis de Fourier desenrolla ante la vista el arco iris de cada sistema.

El curso de métodos matemáticos de la física que imparto en la Facultad de Ciencias de la UAEM cubre el tema “análisis de Fourier” en 6 semanas. La notación y los conceptos actuales simplifican su presentación y hacen más evidentes sus propiedades fundamentales –además, con el uso de computación electrónica, se puede modelar, graficar y verificar el análisis aplicado a señales finitas. En contraste, leer la

*Mémoire* de Fourier resulta bastante trabajoso (poco menos que el *Discourse sur la Méthode* de Descartes, o los *Principia Mathematica* de Newton, pero aún así difícil) por lo detallado de su argumentación en puntos ya solventados por matemáticos posteriores, y por sus saltos de tigre al formular conclusiones. El objetivo de mi curso es abrir los ojos de los estudiantes para que vean que los fenómenos naturales ocurren en 6 dimensiones: las tres que vemos, y las tres de frecuencias que les corresponden. Éste es el *espacio fase* donde las ecuaciones muestran las entrañas de la física.

Mucha agua ha pasado por el Sena frente a las puertas de la Academia donde Fourier discurría y discutía con su pléyade de amigos y rivales: Laplace, Lagrange, Monge, Rodrigues, Arago, Legendre, Fresnel, y muchos otros que conocemos por sus fórmulas, métodos y leyes. Los matemáticos franceses tienen fama de contestatarios y preciosistas, fieros, envidiosos y apasionados. Refiriéndose a sus enemigos Biot y Poisson, Fourier había escrito: “No se extienden las fronteras de la ciencia presentando, en forma dicha diferente, lo que no ha encontrado uno mismo y, sobre todo, excluyendo al verdadero autor del trabajo”. Contrario a la restauración de Luis XVIII, Fourier se rehusó a salir en la foto con el gordo rey que usurpó el trono, tan diferente de su ilustrado Emperador, quien lo había hecho crecer. Después que Napoleón murió en Santa Helena, Fourier aceptó ser Secretario Vitalicio de la Academia en 1822. Murió en 1830 sin conocer la verdadera trascendencia de su obra, atestiguada por doscientos años de evolución matemática y de aplicaciones en ramas de la ciencia que él no podría imaginar. Pero Joseph Fourier sigue vivo, porque los que trabajamos con sus métodos tenemos todos los días su nombre en los labios.

# El cero y el infinito

**Kurt Bernardo Wolf**

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM Campus Morelos  
Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos, A. C.

En el año 999 Gerbert de Aurillac ascendió al Trono de San Pedro con el apoyo del emperador Otón III, de la dinastía carolingia, tomando el nombre de Silvestre II. Su homónimo Silvestre I había sido Obispo de Roma durante la conversión de Constantino y, canonizado, su fiesta se celebraba el 31 de diciembre. Por ello se rumoraba que cumplía la profecía del Apocalipsis 20:1–3, y era el Anticristo vivo sobre la tierra al cabo del milenio. Era sospechoso por varios motivos, entre ellos su notable curiosidad intelectual, que lo llevó a estudiar con matemáticos judíos y sarracenos en España durante su juventud. Aunque su reinado duró apenas tres años (como había predicho Juan en Patmos), Gerbert tuvo una influencia milenaria: introdujo a Europa el ábaco.

Los numerales hebreos, griegos y romanos utilizan las letras del alfabeto; son útiles para representar números pequeños, pero son muy difíciles para trabajar seriamente con ellos. ¿Cuántos son CCXLIX panes más CLVIII panes? ¿Cómo se reparten MDCCCXXV ducados entre LVII soldados? Con el ábaco, verdadera computadora digital, los números se representan por cuentas sobre varillas de unidades, decenas, centenas, etc., y se hace patente la existencia del cero. Generaciones de banqueros utilizaron con deleite el nuevo aparato y, por extensión, adoptaron el sistema de numeración arábica, donde la ausencia de una potencia de diez se representa por un punto. Posteriormente éste fue convertido en el bello símbolo 0 del orbe vacío. Paradójicamente, el cero es también indispensable para representar los números grandes, continuando la extensión vertical del ábaco hacia arriba y hacia abajo para representar fracciones decimales cada vez menores, como mucho antes deben haberlo hecho los pitagóricos de Alejandría. Así, el cero está preñado con el embrión del infinito.

“¿Cuál es el número más grande, papá?” (“¡Cállate y vete a ver la tele!”) Dadme cualquier número y os daré uno mayor –sumándole uno. El concepto del infinito es más difícil de aprehender porque está cargado de significados religiosos. Tratando de conciliar la lógica aristotélica con afirmaciones reveladas, Moisés Maimónides y Tomás de Aquino laboraron y escribieron sobre el infinito; en particular, el Doctor Angélico formuló cinco argumentos racionales para probar la existencia de Dios en su *Summa Theologica*, escrita a mediados del siglo XIII. Argüía sobre primeras causas y últimos propósitos, pues no podía aceptarse que regresiones y sucesiones no tuviesen un término finito. Seguramente nos encontramos con este problema –en versión

simplificada– cuando en primaria nos pidieron dividir diez entre tres, y descubrimos que la división producía una cadena interminable de trespes; y nos encontramos mirando a los ojos de un pequeño infinito.

Presentaré un argumento desarrollado por los griegos alejandrinos muchos siglos antes del Dr. de Aquino para demostrar que la raíz cuadrada del número 2 no puede ser escrita como la razón de dos primos relativos. Es decir, que no existen dos números enteros  $p$  y  $q$  sin divisores comunes, tales que  $(p/q)^2 = 2$ . Pues si proponemos la hipótesis de que tales dos números existen, entonces  $p^2 = 2q^2$  sería un número par, lo cual implicaría que  $p$  es par (por favor querido lector, verifica esta afirmación), y podríamos escribir  $p = 2r$ , con  $r$  algún entero. Y entonces, reemplazando,  $4r^2 = 2q^2$ , o sea  $q^2 = 2r^2$ , por lo cual  $q$  también sería par. Y así llegaríamos a la conclusión que tanto  $p$  como  $q$  son divisibles entre 2, y no primos relativos, que era nuestra hipótesis. Ergo, la hipótesis es falsa, y no existen tales  $p$  y  $q$ .

Este método de demostración se llama *reductio ad absurdum* (reducción al absurdo) y no es trivial para el entendimiento humano. Tampoco es trivial para las matemáticas, pues mientras que la representación decimal de cualquier razón de enteros  $p/q$  contiene un ciclo de dígitos que se repite (como el 3.333...), la raíz cuadrada de 2 tiene una representación decimal (o binaria, o vigesimal, o en cualquier base) donde los dígitos no repiten patrón alguno, y tienen las características de una sucesión infinita de números al azar. Y en este caso el infinito que nos encontramos mirando tiene los ojos de una temible bestia. Los pitagóricos formaban una sociedad hermenéutica, con secretos como la existencia del dodecaedro, que no debían ser revelados al común de los mortales. No sé si el Dr. de Aquino reconocería la similitud entre el aparente problemita de la raíz de dos con los suyos, que habrán sido considerablemente mayores.

Pero no solamente la raíz cuadrada de 2 es un número irracional (es decir, no-racional, no la razón de dos enteros); también es su raíz cúbica, cuarta, etc., y las raíces de cualquier entero que no sea cuadrado perfecto; también lo es el número  $\pi$  (pi, la razón de la circunferencia al diámetro de cualquier círculo plano, 3.141592654...), y cualquier múltiplo o submúltiplo de él. El número  $e$  (la base de los logaritmos naturales),  $\gamma$  (la constante de Euler-Mascheroni), y cualquier suma o producto de éstos y otros números irracionales que los matemáticos han estudiado durante los últimos dos o trescientos años. De esta manera hemos domando poco a poco el cero y el infinito, éste entendido como

un límite –no como un número, y ordenando la línea completa de los números reales. También hemos introducido otros números que nunca estuvieron patentes a la vista humana, como aquellos compuestos con la famosa raíz cuadrada de menos-uno,  $i^2 = -1$ : los números complejos, indispensables para formular la mecánica cuántica de los fenómenos microscópicos; los cuaterniones, octoniones y números de Klein, los cuales no conmutan (  $xy$  distinto de  $yx$  ), o no asocian (  $xy$  por  $z$  distinto de  $x$  por  $yz$  ), con un largo etcétera.

En la callada épica del cero al infinito hay muchos héroes cuyos nombres no están ni modestamente representados en las calles de Cuernavaca: Cardano, Napier, Copérnico, Galileo, Newton, Fourier, Euler, Gauss, Cantor, Hilbert, Banach, y cientos de otros matemáticos que tuvieron la curiosidad por entender

el universo de los números y de otros entes abstractos que ellos mismos crearon fuera de la Creación, analizándolos brillantemente para descubrir sus insólitas propiedades.

El cero que conocían los mayas –el Kinam– feneció con el derrumbe de su civilización, y sólo debido a las investigaciones arqueológicas sabemos que alguna vez existió. Los alejandrinos continuadores del mítico Pitágoras corrieron una suerte –casi– igual, aunque fueron rescatados por los árabes que tuvieron su época de oro durante el califato de Bagdad. Es difícil imaginar en qué estadio estaríamos si aún trabajáramos el infinito con la pesada lógica tomista de silogismos y revelaciones místicas, o con el simple ábaco de Gerbert de Aurillac.



---

**ESTE LIBRO SE TERMINÓ DE IMPRIMIR EL 28 DE SEPTIEMBRE DE 2013, EN LOS TALLERES DE PERIÓDICO DIARIO DE INFORMACIÓN GENERAL ECÓS DE MORELOS, S.A. DE C.V. (LA UNIÓN DE MORELOS) CON UN TIRAJE DE 1,000 EJEMPLARES, MÁS SOBANTES PARA REPOSICIÓN**

---



La Academia de Ciencias de Morelos en conjunto con el equipo de "TV Minutos" de "La Unión de Morelos" y "Más Ciencia por México", transmiten el **programa en línea "Charlas con Científicos"**, el cual reúne a miembros de la ACMor con invitados relevantes para nuestro Estado y nuestro país, expertos en diferentes disciplinas.

Te esperamos en "Charlas con Científicos"  
**jueves a las 17:00hrs. en [www.acmor.org.mx](http://www.acmor.org.mx)**

## Librería

Visita nuestra librería en línea en **[www.acmor.org.mx](http://www.acmor.org.mx)**, en donde podrás encontrar diversos títulos escritos por miembros de nuestra Academia.



**Congreso de Investigación  
CUAM - ACMor**



**Biblioteca de Ciencias**



**Olimpiadas de la Ciencia**



**Proyectos de Investigación**



**Un Reto para Hoy**



**Coloquios Científicos**



**Verano Morelense  
de la Investigación**



**Mentor de Ciencias**

# La Unión

DE MORELOS

[www.launion.com.mx](http://www.launion.com.mx)



ACADEMIA DE CIENCIAS  
DE MORELOS, A.C.

[www.acmor.org.mx](http://www.acmor.org.mx)

©Imágenes: El Bibliomata, justDONQUE, Química orgánica y posvasos\_matemáticas.

ISBN: 978-607-95682-3-8



9 786079 568238