







EUSEBIO JUARISTI  
LINDA R. MANZANILLA  
MARIO MOLINA

*Miembros de El Colegio Nacional*

*Coordinadores*

*Marzo*  
*Jueves 19*  
*10:00 horas*

**SIMPOSIO**  
**LA QUÍMICA:**  
**EL FUNCIONAMIENTO**  
**DEL UNIVERSO,**  
**LOS SERES VIVOS**  
**Y LAS ACTIVIDADES**  
**HUMANAS**



@ColegioNa\_mx

f ColegioNacional.mx

[hola@colnal.mx](mailto:hola@colnal.mx)



transmisión  
en vivo

[colnal.mx](http://colnal.mx)

2015

**EL COLEGIO NACIONAL**  
LIBERTAD POR EL SABER

ENTRADA LIBRE Y GRATUITA





Eusebio Juaristi y Linda R. Manzanilla Naim.



# SIMPOSIO

EUSEBIO JUARISTI

LINDA R. MANZANILLA NAIM

*Coordinadores*

La química:  
el funcionamiento del universo,  
los seres vivos y las actividades humanas

QD1  
Q85 2015

La química : el funcionamiento del universo, los seres vivos y las actividades humanas / Coordinadores, Eusebio Juaristi y Linda Rosa Manzanilla Naim. -- Primera edición. -- México: El Colegio Nacional, 2015

191 páginas ; 24 centímetros

ISBN 978-607-724-137-9

I. Química -- Discursos, ensayos, conferencias. I. Título.  
II. El Colegio Nacional.

D. R. © 2015. El Colegio Nacional  
Luis González Obregón núm. 23, Centro Histórico  
C. P. 06020, México, D. F.  
Teléfonos: 57 02 17 79 y 57 89 43 30

ISBN: 978-607-724-137-9

Impreso y hecho en México  
*Printed and made in Mexico*

Correos electrónicos: publicaciones@colnal.mx  
editorial@colnal.mx  
contacto@colnal.mx

www.colnal.mx

# CONTENIDO

EUSEBIO JUARISTI  
LINDA R. MANZANILLA NAIM

*Prólogo*

11

- El origen de los elementos

*Manuel Peimbert Sierra*

13

- Estructura interna y composición de la Tierra

*Jaime Urrutia Fucugauchi*

*Ligia Pérez Cruz*

35

- Algunas contribuciones de la química en beneficio de la humanidad

*Attila Pavlath*

*Eusebio Juaristi*

57

- La química y la medicina: dos episodios en su historia

*Ruy Pérez Tamayo*

87

- La química de la calle: “drogas de diseño”

*María Elena Medina-Mora*

103

- **La química. Un indicador de actividades del pasado**

*Linda R. Manzanilla Naim*

*117*

- **¿Músico o químico? Alexander Borodin (1833-1887)**

*Adolfo Martínez Palomo*

*135*

- **La sopa primitiva y la química del origen de la vida**

*Antonio Lazcano Araujo*

*151*

- **La química del medio interestelar**

*Luis Felipe Rodríguez Jorge*

*165*

## Prólogo

EUSEBIO JUARISTI  
LINDA R. MANZANILLA NAIM

La función principal de los miembros de El Colegio Nacional consiste en contribuir a la difusión de la cultura y la ciencia en México. Dicha actividad se lleva a cabo generalmente a través de conferencias impartidas en el Aula Mayor de El Colegio Nacional o en el interior de la República. Por lo general, dichas conferencias son presentadas de forma individual, pero en ocasiones dos o más miembros de El Colegio Nacional han participado en forma conjunta para la realización de simposios, series de conferencias u otras actividades.

El 19 de marzo del año en curso, los abajo firmantes organizamos el simposio “La química: el funcionamiento del universo, los seres vivos y las actividades humanas” con la participación de 10 miembros de El Colegio Nacional, los doctores Francisco Bolívar Zapata, Eusebio Juaristi, Linda R. Manzanilla Naim, Adolfo Martínez Palomo, María Elena Medina-Mora, Mario Molina, Manuel Peimbert, Ruy Pérez Tamayo, Ranulfo Romo y Jaime Urrutia Fucugauchi. Estaremos por siempre agradecidos por su amable disposición para participar en este proyecto.

El objetivo central del simposio consistió en mostrar la relevancia de la química en las áreas de trabajo de los miembros de El Colegio Nacional participantes, con la idea de que las distintas charlas conducirían a una mayor apreciación de la ciencia en general y de la química en particular. Además, ¿por qué no?, y a raíz de este simposio, ver que algunos de los jóvenes presentes en esa sala, o que siguieron el evento por Internet, se sintieran motivados a dedicar su vida al estudio de las ciencias.

El notable éxito alcanzado en este simposio, en particular el gran interés mostrado por los numerosos asistentes, motivó la preparación del presente libro, que reúne las siguientes contribuciones:

1. “El origen de los elementos”  
(Manuel Peimbert)

2. “Estructura interna y composición de la Tierra”  
(Jaime Urrutia Fucugauchi y Ligia Pérez Cruz)
3. “Algunas contribuciones de la química en beneficio de la humanidad”  
(Attila Pavlath y Eusebio Juaristi)
4. “La química y la medicina: dos episodios en su historia”  
(Ruy Pérez Tamayo)
5. “La química de la calle: ‘drogas de diseño’”  
(María Elena Medina-Mora)
6. “La química. Un indicador de actividades del pasado”  
(Linda R. Manzanilla Naim)
7. “¿Músico o químico? Alexander Borodin (1833-1887)”  
(Adolfo Martínez Palomo)
8. “La sopa primitiva y la química del origen de la vida”  
(Antonio Lazcano Araujo)
9. “La química del medio interestelar”  
(Luis Felipe Rodríguez Jorge)

Creemos que lo interesante de todos los temas que se presentan hará de este libro una lectura amena y enriquecedora. Además, seguramente motivará a un número significativo de lectores a profundizar sus conocimientos y apreciación de las ciencias.

9 de octubre de 2015.

# El origen de los elementos

MANUEL PEIMBERT SIERRA

## I. INTRODUCCIÓN

Uno de los temas a los que se dedica la astronomía es el origen de los elementos de la tabla periódica, es decir, el origen de todos los átomos que existen en el universo. Hasta el momento la tabla periódica incluye 118 elementos, la mayoría de ellos, del 1 al 92, se encuentra en la naturaleza; el resto, del 93 al 118, se ha producido artificialmente en los laboratorios de altas energías. El número asociado a cada elemento corresponde al conjunto de protones que se encuentra en su núcleo.

Los elementos del 93 al 118 también los producen las estrellas, pero debido a que su vida media es muy corta se desintegran rápidamente. Sólo el 93, 94 y 95 se han encontrado en cantidades muy pequeñas en minas terrestres.

Las razones para que los astrónomos se dediquen al estudio del origen de los elementos químicos son muchas, mencionaré sólo algunas:

- a) Los astrónomos trabajan para conocer el origen y la evolución de todo lo que existe en el universo, del cual son parte los elementos químicos. Éstos contienen alrededor de 5% de la masa del universo, la materia oscura 27% y la energía oscura 68%. La materia oscura se debe a partículas desconocidas y la energía oscura es la responsable de la aceleración de la expansión del universo a grandes distancias.
- b) A partir de la abundancia relativa de los elementos es posible poner restricciones observacionales a algunas de las teorías principales de la astronomía, como son la evolución del universo observable, la evolución de las estrellas y la de las galaxias.
- c) Para determinar las abundancias relativas de los elementos, es necesario utilizar la espectroscopía de las estrellas y de las nebulosas gaseosas donde se originan las líneas de absorción y de emisión de los elementos. Las intensidades de las líneas emitidas por las nebulosas y

las estrellas se pueden reproducir por medio de modelos; éstos incluyen las condiciones físicas en cada objeto, como son la temperatura, la densidad, la presión, etc., así como de los cálculos de la física atómica necesarios para determinar las abundancias de los elementos. Las observaciones no sólo nos permiten comprobar los modelos de estos objetos sino también la precisión de la física atómica utilizada.

- d) La mayoría de los elementos se produce por las reacciones nucleares en el interior de las estrellas, o durante la gran explosión en los primeros minutos del inicio de la expansión del universo. Utilizando la física nuclear se puede predecir cuál es la magnitud de estos procesos, pero se requieren excelentes modelos del interior de las estrellas y del inicio de la expansión del universo, así como de observaciones de gran calidad para demostrar si las predicciones teóricas de la física nuclear son lo suficientemente precisas para validar los modelos.

Los elementos se originan principalmente durante la gran explosión, durante la evolución de las estrellas de baja masa y durante la evolución de las estrellas muy masivas. También se pueden producir por la colisión de rayos cósmicos (átomos que se originan en la explosión de supernovas y que viajan a gran velocidad) que astillan o fracturan a núcleos atómicos en el medio interestelar, y por la acción del hombre en la Tierra, ya sea por la explosión de bombas nucleares o por la generación de elementos en los laboratorios y las plantas nucleares.

## II. TEORÍA DE LA GRAN EXPLOSIÓN Y LA FORMACIÓN DEL HIDRÓGENO, HELIO, DEUTERIO Y LITIO, PRIMORDIALES

La Teoría de la Gran Explosión (TGE) está basada en tres resultados observacionales: la expansión del universo, la existencia de la radiación fósil o de fondo, y la formación de hidrógeno, helio, deuterio y litio durante los primeros cuatro minutos de expansión del universo.

En los años veinte del siglo pasado, varios astrónomos notaron que el universo se encuentra en expansión (Wirtz, 1924; Lundmark, 1925; Lemaitre, 1927 y Hubble, 1929). Este resultado se basó en la observación de la velocidad de recesión de las galaxias. Entre más lejos se encuentran de nosotros más rápidamente se alejan, lo cual indica que en el pasado las galaxias se encontraban más cercanas entre sí.

Si dividimos la velocidad con la que se separan los cúmulos de galaxias entre la distancia que los separa, sabremos cuánto tiempo ha pasado desde que se inició la expansión del universo. A esta división se le llama la constante de Hubble,

que tiene un valor de 71 km/seg por cada megapársec de distancia. Un cúmulo de galaxias a 10 megapársecs de distancia se aleja de nosotros a una velocidad de 710 km/seg. Al hacer la división de la velocidad a la que se alejan los cúmulos de galaxias entre la distancia a la que se encuentran, hallamos que el universo lleva expandiéndose 13 mil 800 millones de años, aproximadamente tres veces la edad de la Tierra.

En 1965 los astrónomos Penzias y Wilson descubrieron la radiación fósil o de fondo, por lo cual obtuvieron el Premio Nobel de Física en 1978 (véase figura 1). La existencia de la radiación de fondo es una predicción de la TGE, esta radiación corresponde a un campo de radiación que emite como un radiador perfecto, también llamado cuerpo negro, con una temperatura un poco menor a tres grados Kelvin (que equivale a menos 270 grados centígrados).

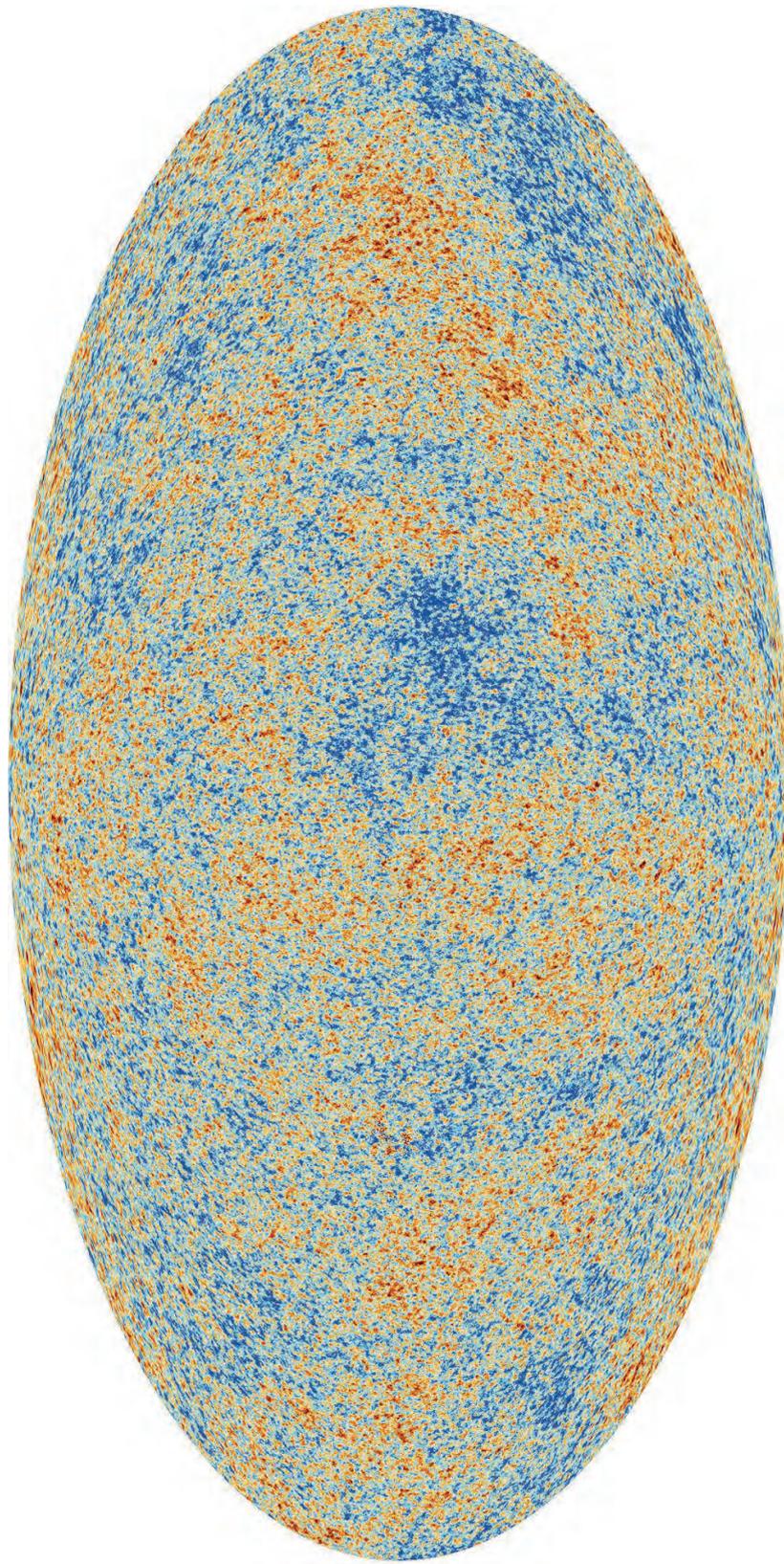
Cada vez que se duplica la distancia entre dos puntos, debido a la expansión del universo, se puede demostrar que la temperatura de la radiación de éste disminuye a la mitad. De acuerdo con la TGE, la distancia entre dos puntos en el universo es alrededor de 6 mil millones veces mayor que cuando éste tenía un segundo de haber iniciado su expansión, lo cual implica que en ese momento el campo de radiación correspondía a una temperatura cercana a 15 mil millones de grados centígrados.

Adoptando la TGE y la temperatura observada de la radiación de fondo, también podemos estudiar las reacciones nucleares que ocurrieron durante los cuatro minutos que siguieron al momento de la gran explosión. Un segundo después de iniciada la expansión, la densidad era de 100 mil gramos por centímetro cúbico. En ese momento, el universo estaba formado por fotones, electrones, protones, neutrones, neutrinos y positrones; los neutrones y protones producían átomos de deuterio (isótopo del hidrógeno con un protón y un neutrón) mediante reacciones nucleares, pero debido a otras reacciones nucleares el deuterio se destruía; por lo tanto no podían formarse átomos más pesados que el hidrógeno, el cual sólo tiene un protón.

Después de tres minutos, el deuterio se volvió estable y fue posible, a partir de reacciones nucleares del deuterio con protones, formar partículas de helio tres (isótopo de helio con dos protones y un neutrón). Los neutrones y los átomos de helio tres participaron en reacciones nucleares que llevaron a la mayoría de los átomos de helio tres a convertirse en átomos de helio cuatro (constituidos por dos protones y dos neutrones).

A los cuatro minutos, la temperatura disminuyó a 800 millones de grados centígrados y ya no hubieron reacciones nucleares, desde este momento la composición química del universo se mantuvo constante, hasta que se formaron las primeras estrellas, constituida por 75% de hidrógeno, 25% de helio cuatro (por unidad de masa) y por pequeñas cantidades de deuterio, helio tres y litio siete

Figura 1.  
FLUCTUACIONES DE TEMPERATURA OBSERVADAS EN LA LUZ MÁS ANTIGUA DEL UNIVERSO (QUE SE MUESTRAN  
COMO DIFERENCIAS DE COLOR), COMO SE VEN AHORA CON EL SATÉLITE PLANCK.



Cortesía de la Agencia Espacial Europea.

Las fluctuaciones de temperatura se deben a pequeñas aglomeraciones de materia que estaban presentes cuando el universo era muy joven (cuando tenía una edad de 380 mil años), las cuales dieron origen posteriormente a las galaxias y a los cúmulos de galaxias que observamos hoy en día. Las diferencias de temperatura son de cienmilésimas de grado Kelvin en relación con el valor promedio. El valor promedio es de 2.725 grados Kelvin (menos 271.425 grados centígrados), las regiones azul oscuro, que son las más frías, se encuentran veinte cienmilésimas de grado más frías que el promedio y las anaranjadas, que son las más calientes, se encuentran veinte cienmilésimas de grado más calientes que el promedio. En esta figura se muestra una representación en dos dimensiones de la bóveda celeste semejante a la representación de los continentes de la Tierra en un mapamundi plano.

(formado por tres protones y cuatro neutrones). A las abundancias producidas en estos primeros cuatro minutos se les llama primordiales, para diferenciarlas de las abundancias que se obtienen de objetos ya enriquecidos por reacciones nucleares que se produjeron en las estrellas.

Las abundancias primordiales de hidrógeno y de helio predichas por la TGE han sido comprobadas por medio de observaciones de galaxias irregulares que han formado muy pocas estrellas y por lo tanto, casi no han sido contaminadas por la expulsión de gas de las estrellas al final de su evolución (véanse figuras 2 y 3). Este gas contiene helio adicional y otros elementos pesados producidos por reacciones nucleares que ocurren en el interior de las estrellas.

Figura 2.

REGIÓN DE FORMACIÓN ESTELAR EN LA GALAXIA IRREGULAR I ZWICKY 18.



Cortesía de Y. Izotov, Observatorio Astronómico de la Universidad de Kiev, Ucrania y T. Thuan, Universidad de Virginia, Estados Unidos; imagen obtenida con el Telescopio Espacial Hubble de la NASA.

Se trata de la galaxia conocida más pobre en elementos pesados. Muestra nebulosas ionizadas de intensidad moderada. Esta galaxia tiene casi toda su materia bariónica en forma de gas, que prácticamente no ha sido contaminado por los productos de la evolución estelar. Al determinar la composición química del gas en galaxias como ésta se determina la composición química primordial con la que se formaron las galaxias, la cual resulta ser de aproximadamente 25% de helio y 75% de hidrógeno por unidad de masa.

Figura 3.  
REGIÓN DE FORMACIÓN ESTELAR EN LA GALAXIA IRREGULAR NGC 2363.



Cortesía de Laurent Drissen e Yvan Dutil, Canadian French Hawaiian Telescope, así como de la NASA y el Instituto Científico del Telescopio Espacial Hubble.

Esta región es una de las más brillantes conocida con una pequeña cantidad de elementos pesados. Este objeto ha sido estudiado por muchos grupos diferentes de astrónomos para determinar la abundancia de helio primordial.

### III. FORMACIÓN DE LAS ESTRELLAS

A los cuatro minutos, a partir del inicio de la expansión del universo, el hidrógeno y el helio se encontraban ionizados ya que la temperatura era de 800 millones de grados. La expansión hizo que el campo de radiación se enfriara y 380 mil años después su temperatura disminuyó a 3 mil grados Kelvin, equivalente a la de la superficie de una estrella roja. A esta temperatura los átomos de hidrógeno ionizado, es decir, los protones, se combinaron con los electrones formando átomos de hidrógeno neutro y el universo se volvió transparente a la radiación en el visible.

Algunas decenas de millones de años después se formaron las primeras estrellas y se empezaron a formar las galaxias. En la actualidad las estrellas que se

forman en nuestra galaxia, y en las galaxias cercanas, tienen masas comprendidas entre 0.08 masas solares y 120 masas solares. Se definen como estrellas aquellos objetos que alcanzan una temperatura de 15 millones de grados centígrados en su centro y que, por lo tanto, son capaces de transmutar hidrógeno en helio a partir de reacciones nucleares. Los objetos con masas menores que 0.08 masas solares no logran alcanzar los 15 millones de grados y por lo tanto no pueden formar helio, que es la fuente principal de energía durante la mayor parte de la vida de las estrellas. Los objetos que nacen con más de 120 masas solares se vuelven inestables y se pueden fragmentar en estrellas de menor masa o perder masa rápidamente para convertirse en estrellas con menos de 120 masas solares.

Las estrellas se pueden dividir en dos grupos: las de baja masa, con menos de ocho masas solares, y las de alta masa con más de ocho masas solares. Las estrellas de baja masa son aquellas que terminan su vida al expulsar las capas externas formando una nebulosa planetaria y el remanente estelar termina su vida como una enana blanca. Se llaman estrellas de alta masa aquellas que terminan su evolución explotando como supernovas. Durante la explosión existen tres posibilidades: se desintegran o dejan como remanente compacto una estrella de neutrones o un hoyo negro.

#### IV. EVOLUCIÓN DE LAS ESTRELLAS DE BAJA MASA Y FORMACIÓN DE PARTE DEL CARBONO, NITRÓGENO, OXÍGENO Y HELIO NO PRIMORDIAL

Las estrellas se pasan la mayor parte de su vida transmutando hidrógeno en helio, las más masivas viven unos cuantos millones de años y las menos miles de millones de años. Todas las estrellas que nacieron con menos de 0.75 masas solares agotarán el hidrógeno en su centro en un tiempo mayor al transcurrido desde la gran explosión, y por lo tanto, todavía están transmutando hidrógeno en helio en su interior, no han expulsado masa en cantidades apreciables por lo cual no han contribuido al enriquecimiento del medio interestelar con nuevos elementos químicos. Las estrellas que nacieron con una masa solar o más, si nacieron hace menos de 11 mil millones de años ya modificaron la composición del medio interestelar.

El Sol se formó hace aproximadamente 4 mil 500 millones de años. Durante todo este tiempo casi toda la energía del Sol se ha debido a la transformación de hidrógeno en helio. Se requiere fusionar cuatro átomos de hidrógeno para formar uno de helio. Esta fusión se realiza por medio de reacciones nucleares que ocurren en las regiones centrales del Sol que se encuentran a una temperatura de 15 millones de grados centígrados. Cada segundo el Sol produce alrededor de diez elevado a la potencia 38 (un 1 seguido de 38 ceros) átomos de helio. El Sol ha estado produciendo esta cantidad de helio casi desde su formación y lo seguirá

haciendo por 5 mil millones de años más, hasta que el hidrógeno de su núcleo se agote por completo. La fusión del helio produce energía porque la masa de cuatro átomos de hidrógeno es mayor que la masa del helio, la diferencia de masa se convierte en energía de acuerdo con la ecuación de Einstein: la energía es proporcional a la masa por la velocidad de la luz al cuadrado.

Durante los próximos 5 mil millones de años la luminosidad de la superficie del Sol irá aumentando lentamente. En los próximos 600 millones de años ese incremento elevará la temperatura de la superficie de la Tierra del orden de cuatro grados centígrados. Este aumento es similar al que la humanidad podría llegar a producir en los próximos 100 años si no se toman medidas para evitar el efecto invernadero debido a la combustión de petróleo y al uso de otras fuentes de energía no renovables.

En 5 mil millones de años se agotará el hidrógeno en el núcleo del Sol y debido a la falta de energía nuclear en el centro se contraerá y calentará hasta alcanzar una temperatura de 150 millones de grados centígrados, a partir de la cual el Sol podrá generar átomos de carbono a través de átomos de helio. Por medio de los procesos triple alfa, tres átomos de helio se van a convertir en uno de carbono, y como el carbono tiene menos masa que la suma de los tres átomos de helio la diferencia de masas se irá en forma de energía de acuerdo con la ecuación de Einstein antes mencionada.

Durante este proceso el Sol se convertirá en una estrella gigante roja y su radio se expandirá hasta alcanzar la órbita de la Tierra. El Sol generará su energía transmutando helio en carbono por medio de reacciones nucleares y tres núcleos ionizados de helio (también llamados partículas alfa) se juntarán para formar uno de carbono. Después de unos cientos de millones de años todo el helio en el núcleo se convertirá en carbono. A partir de reacciones nucleares adicionales, una fracción del carbono se convertirá en nitrógeno y una fracción aún menor en oxígeno y la estrella dejará de tener fuentes de energía. Debido a la alta densidad del núcleo, la materia no se podrá comprimir más y no podrá generar las reacciones nucleares que producen elementos más pesados. El Sol expulsará sus capas externas, las cuales formarán lo que se llama una nebulosa planetaria y lo que quede en el centro será una estrella enana blanca. La nebulosa planetaria se disipará en alrededor de 10 mil años, la enana blanca no tendrá ya fuentes de energía y se irá enfriando lentamente durante miles de millones de años. Las nebulosas planetarias han sido divididas en cuatro tipos; las de tipo I las producen las estrellas que al nacer tienen entre dos y ocho masas solares y las de tipos II, III y IV emitidas por las estrellas que al nacer tienen menos de dos masas solares (figuras 4 y 5).

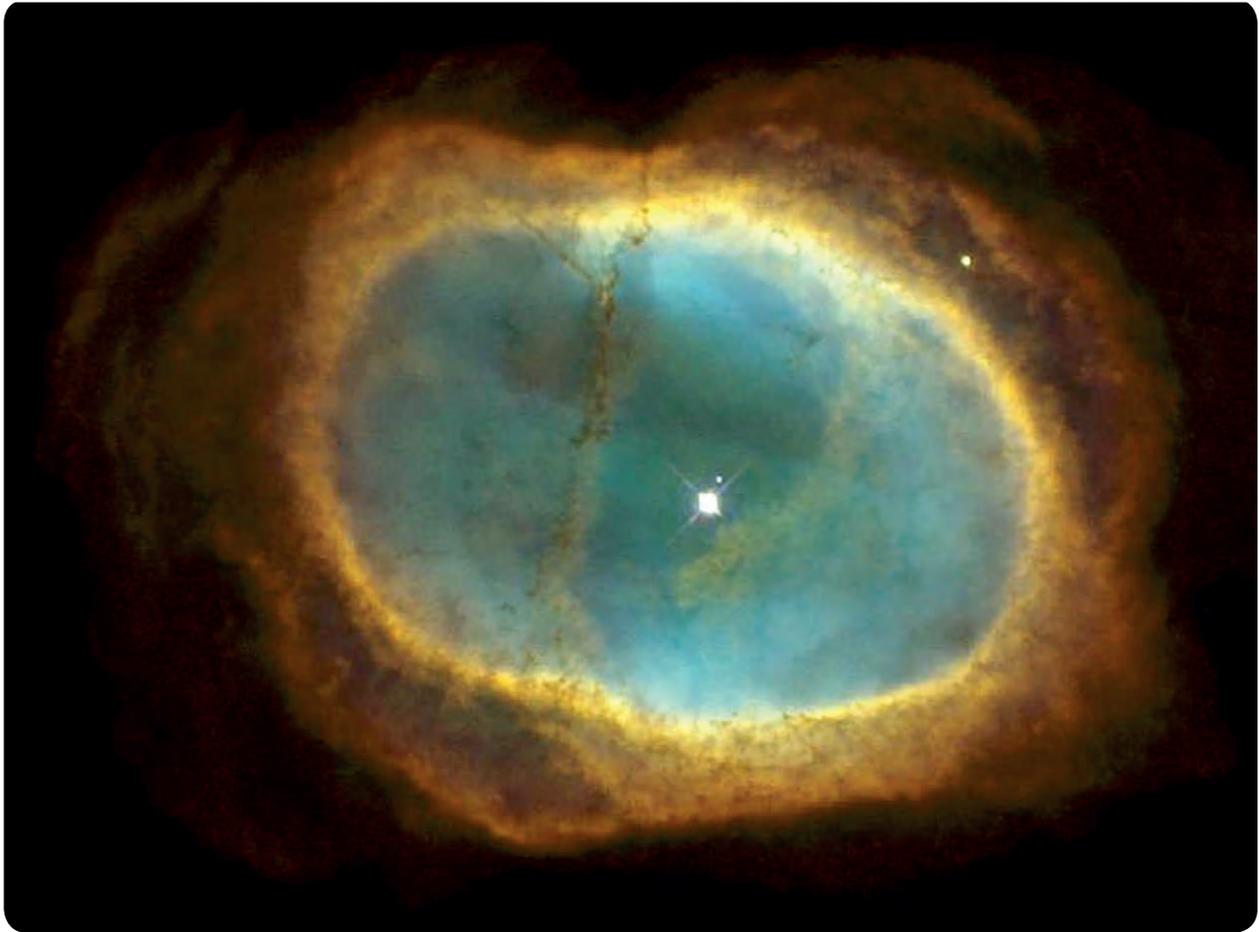
Figura 4.  
NEBULOSA PLANETARIA NGC 6543 DE TIPO I.



Cortesía de la NASA y el Instituto Científico del Telescopio Espacial Hubble.

Descubierta por William Herschel en 1786, este objeto está enriqueciendo el medio interestelar con helio, carbono, nitrógeno y oxígeno producidos durante su evolución.

Figura 5.  
NEBULOSA PLANETARIA NGC 3132.



Cortesía de la NASA y el Instituto Científico del Telescopio Espacial Hubble.

Se trata también de una nebulosa planetaria de tipo I que ha sido ampliamente estudiada. Muestra dos estrellas en su centro, la más débil fue la que expulsó la envoltura nebulosa, y está en el proceso de convertirse en una enana blanca, la más intensa en un futuro lejano, dentro de millones de años, también expulsará sus capas externas formando otra nebulosa planetaria.

Las estrellas con menos de ocho masas solares evolucionarán como el Sol, es decir, produciendo una nebulosa planetaria durante su transición de gigantes rojas a enanas blancas y enriqueciendo el medio interestelar con el material procesado por las reacciones nucleares en su interior.

Las estrellas de baja masa son las responsables de la mitad del helio que se encuentra en la vecindad solar —que no es de origen primigenio—, de la mitad del carbono de 80% del total de nitrógeno y de 10% del total del oxígeno. También son responsables de una fracción importante de los elementos más masivos que el germanio (con un número de protones en el núcleo mayor a 32) formados por la captura de neutrones en una escala de tiempo larga, que se conoce como el proceso  $s$ . Los elementos más masivos que el germanio son muy poco abundantes y no afectan la evolución de las estrellas de baja masa.

## V. EVOLUCIÓN DE LAS ESTRELLAS MASIVAS Y LA FORMACIÓN DEL RESTO DEL CARBONO, NITRÓGENO, OXÍGENO Y HELIO NO PRIMORDIAL, ASÍ COMO DE LOS DEMÁS ELEMENTOS

Las estrellas con más de ocho masas solares evolucionan al principio como el Sol, su etapa de contracción inicial las lleva a alcanzar 15 millones de grados en el núcleo y a transformar hidrógeno en helio. Una vez que se acaba el hidrógeno en el núcleo, éste se contrae y alcanza una temperatura de 150 millones de grados centígrados con la cual es posible transformar helio en carbono por la unión de tres partículas alfa (se trata de partículas de helio dos veces ionizado). Una vez que a las estrellas se les agota el helio en el centro de la estrella, éste se convierte en un núcleo de átomos de carbono y se produce una diferencia cuantitativa en relación con las estrellas de baja masa. La densidad del núcleo de las estrellas masivas es menor que las de baja masa debido a que su radio es mayor, una densidad menor permite que el núcleo se contraiga y alcance la temperatura suficiente para que a partir de reacciones nucleares con elementos más pesados se puedan producir todos los elementos desde el oxígeno hasta el hierro. El núcleo de hierro alcanza una temperatura de 5 mil millones de grados. Todas las reacciones nucleares que llevan del hidrógeno al hierro son exotérmicas, esto es, que la suma de la masa de las partículas atómicas involucradas es mayor que la masa de la partícula resultante; la diferencia de masas es la que se convierte en energía.

Las reacciones nucleares que involucran al hierro requieren la energía en lugar de producirla, porque los elementos más pesados que el hierro pesan más que la suma de las masas de los átomos involucrados en las reacciones nucleares. Al restarle energía al núcleo de la estrella, las reacciones nucleares que producen los elementos más pesados que el hierro enfrían el núcleo. Esta considerable reduc-

ción en la temperatura disminuye la presión y se produce el colapso gravitacional del núcleo. Éste, que tenía un radio de varios miles de kilómetros, se colapsa y se convierte en un núcleo de una decena de kilómetros de radio. Durante el colapso, que dura alrededor de un segundo, se libera una energía de alrededor de 10 a la 51 ergs (un 1 seguido de 51 ceros), esta energía expulsa todas las capas exteriores al núcleo hacia el medio interestelar, dando origen a lo que se llama una supernova de tipo II (figura 6).

Figura 6.  
REMANENTE DE SUPERNOVA DE TIPO II, CASSIOPEA A.



Cortesía de R. A. Fesen *et al.*, así como de la NASA y el Instituto Científico del Telescopio Espacial Hubble.

Es el remanente más joven de supernova de tipo II que existe en nuestra galaxia. Esta supernova explotó alrededor de 1680 d.C. y presenta sobreabundancias, en el gas expulsado por la supernova, de oxígeno, silicio, azufre, argón y calcio, estas sobreabundancias fueron producto de la evolución de la estrella progenitora.

Como resultado de la evolución de las estrellas masivas que culmina en explosiones de supernovas de tipo II, se producen los elementos restantes de la tabla periódica, es decir, la otra mitad del helio no primigenio, la otra mitad del carbono, 20% del nitrógeno, 90% del oxígeno y los demás elementos desde el neón hasta el hierro y los elementos cercanos a él. Además, por medio de la captura rápida de neutrones, proceso  $r$ , neutrones que se generan durante el segundo que dura el colapso gravitacional, se produce una fracción importante de todos los elementos más pesados que el rubidio; por ejemplo, todos los átomos de uranio y torio presentes en la Tierra.

## VI. ABUNDANCIA RELATIVA DE LOS ELEMENTOS Y LA EVOLUCIÓN QUÍMICA DE LAS GALAXIAS

En el medio interestelar de las estrellas de la vecindad solar, los elementos más abundantes siguen siendo el hidrógeno y el helio. Si consideramos las abundancias por unidad de masa, el hidrógeno, que llamaremos  $x$ , representa 70% de los elementos; el helio, que llamaremos  $y$ , representa 28%, y todos los demás elementos, que llamaremos  $z$  o elementos pesados, sólo 2%. Esto quiere decir que la evolución de las estrellas en la vecindad solar ha incrementado la abundancia de helio en 3% y la de los elementos pesados en 2% y por lo tanto ha disminuido  $x$  en 5% en relación con las abundancias primordiales que son de  $x = 75%$ ,  $y = 25%$  y  $z = 0.00%$ . Como el oxígeno contiene alrededor de la mitad de la masa de todos los elementos pesados, por cada gramo de oxígeno las estrellas han formado tres gramos de helio.

Para determinar las abundancias químicas del medio interestelar se utilizan las regiones ionizadas por estrellas recién formadas, conocidas como regiones H II; el nombre surge porque el elemento más abundante en el medio interestelar es el hidrógeno y éste se encuentra ionizado en estos objetos. Dichas abundancias del medio interestelar son el resultado de la evolución química de las galaxias y el medio interestelar en las galaxias ha capturado el material que ha sido expulsado por las estrellas formadas en el pasado (véase figura 7).

La composición química de la Tierra no es representativa de las abundancias que se encuentran en las galaxias ni en las regiones del medio interestelar donde se forman las estrellas, porque durante su formación se le escaparon el hidrógeno y el helio. Esto se debe a que la velocidad de escape de la superficie de la Tierra es la misma para todos los elementos; pero la velocidad a la que se mueven los átomos depende de su masa, los más pesados son más lentos y por eso no pueden escapar del campo gravitacional terrestre. La presencia de una fracción pequeña de átomos de hidrógeno se debe a que forman parte de las moléculas del agua, las

Figura 7.  
NEBULOSA DE ORIÓN.



Cortesía de M. Robberto, Space Telescope Science Institute/ESA, y del equipo dedicado al proyecto Tesoro de Orión.

Se encuentra al sur del cinturón de Orión en la dirección de la estrella central de la daga de Orión. Es la región más cercana a nosotros donde se está formando un cúmulo estelar de miles de estrellas. Las estrellas más luminosas se encargan de ionizar la nebulosa. Orión es la nebulosa más brillante de nuestra galaxia para un observador situado en la Tierra y es un estándar para determinar las abundancias de los elementos en el medio interestelar de la vecindad solar. Este objeto ha sido enriquecido por los elementos formados en el interior de las estrellas, elementos que han sido expulsados al medio interestelar por las explosiones de supernovas y la formación de nebulosas planetarias durante la evolución de nuestra galaxia.

cuales pesan 18 veces más que un átomo de hidrógeno y por lo tanto se mueven muy lentamente. La cantidad de helio en la Tierra es casi insignificante porque el helio no forma parte de moléculas más masivas, el poco helio que hay en la Tierra se encuentra rodeado por sólidos que han impedido que se escape a la atmósfera de la Tierra y de allí al medio interplanetario. Si se continúa utilizando el helio comercialmente, éste se agotará en la Tierra en unos cuantos cientos de años, lo cual será grave por el uso del helio en la medicina y en la investigación básica. Por otro lado, los cocientes de dos elementos pesados entre sí, por ejemplo el oxígeno y el azufre terrestres, sí son similares a los que se observan en el medio interestelar y en la superficie de las estrellas recién formadas.

A partir de las abundancias de los elementos en las nubes del gas interestelar que se encuentra en las galaxias irregulares y espirales, y también del espectro integrado de todas las estrellas en galaxias lejanas, es posible estudiar cómo evolucionan químicamente las galaxias. Mencionaré tres resultados que se han encontrado de esta manera.

Las galaxias irregulares tienen una masa de gas interestelar similar a la masa en forma de estrellas y un subconjunto de ellas tiene una masa de gas considerablemente mayor que la masa en forma de estrellas. Este subconjunto de galaxias ha formado muy pocas estrellas y por lo tanto no ha contaminado de una manera apreciable la composición química del gas. Estudiando la composición química del gas de este subconjunto es posible extrapolar las abundancias al caso de una contaminación nula por evolución estelar. De esta manera se han encontrado las abundancias primordiales de hidrógeno y de helio, los valores de 75 y 25% mencionados anteriormente. Las galaxias espirales tienen una masa en forma de estrellas mayor que la masa en forma de gas, y la fracción de masa en forma de estrellas disminuye del centro a la orilla del disco espiral mientras que la del gas aumenta. Al determinar el cociente de oxígeno a hidrógeno, como función de la distancia al centro, se encuentra que éste disminuye: existe un gradiente de composición química, que debe ser explicado por los modelos de evolución química de las galaxias. Nuestra galaxia se formó del centro hacia afuera y sigue aumentando su masa capturando gas del medio intergaláctico.

También se encuentra que la fracción de elementos pesados aumenta con la masa de la galaxia, las de menor masa tienen un cociente de oxígeno a hidrógeno menor que las de mayor masa. Este resultado se obtiene para todo tipo de galaxias pero en particular para las elípticas que tienen masas desde un millón hasta 100 billones de masas solares (un 1 seguido de 14 ceros), las galaxias elípticas han transformado más de 98% de su gas en estrellas. Hay cuando menos dos explicaciones para este resultado: *a)* las galaxias de baja masa pueden expulsar hacia el medio intergaláctico parte del oxígeno que forman durante las explosiones de supernovas, mientras que las galaxias de alta masa tienen un campo gravitacional

mayor que impide que se escape el oxígeno, y *b*) las galaxias de baja masa forman pocas estrellas y muy de vez en cuando, lo cual las puede llevar a formar una fracción menor de estrellas mayores a ocho masas solares —que son las que producen la mayor parte del oxígeno— en comparación con las galaxias más masivas. Se requiere de modelos detallados de evolución de las galaxias para determinar la importancia relativa de estas dos posibilidades.

## VII. LA MASA TOTAL DEL UNIVERSO

Estudiando la distribución de variaciones de temperatura, en la radiación fósil o de fondo del universo, por medio del espectro de potencia angular, es posible encontrar la densidad total de materia en el universo observable y a partir de la densidad determinar la geometría del universo (véanse figuras 8 y 9). A partir de la radiación de fondo se encuentran tres componentes de la densidad de masa (o de energía del universo). La suma de estos tres componentes nos indica que el universo es plano o euclidiano. Así que 68% se debe a energía oscura, 27% a materia oscura y 5% a la materia incluida en todos los átomos de la tabla periódica, que se le denomina bariónica y que forma las estrellas, los planetas y todos los objetos que nos rodean en la Tierra, incluidos los seres vivos. Este resultado es sorprendente porque casi todo lo que sabemos sobre la física, la astronomía, el universo y los objetos que lo componen se basa en el estudio de la materia bariónica. Éstas son buenas noticias para las nuevas generaciones porque implica que falta mucho por estudiar y descubrir.

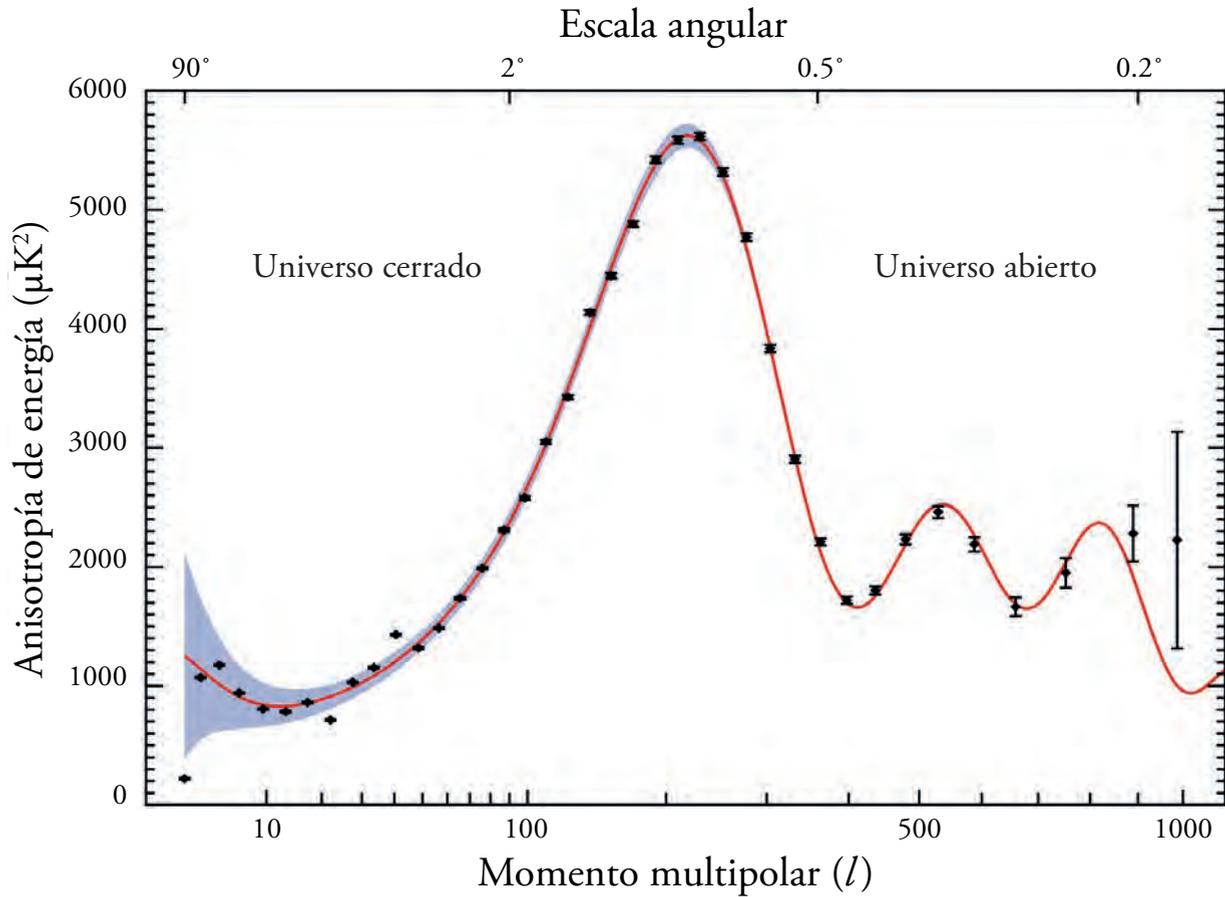
Los resultados obtenidos a partir de la radiación de fondo están apoyados por resultados independientes que menciono a continuación:

- A partir de la TGE y las abundancias de hidrógeno, helio y deuterio primordiales encontradas en el medio interestelar de galaxias cercanas y lejanas, se encuentra que la fracción de masa bariónica que había durante la nucleosíntesis primordial es igual a la que se encuentra por medio de la radiación de fondo.
- A partir del estudio de las velocidades radiales de las galaxias en cúmulos, resulta que la materia oscura debe ser varias veces mayor que el resultado de la suma de la masa bariónica de las galaxias, la que incluye las estrellas y el gas interestelar.
- A partir de lentes gravitacionales producidos por cúmulos de galaxias cercanas, que amplifican y distorsionan la luz proveniente de galaxias lejanas, se encuentra que la materia oscura debe ser como cinco veces más abundante que la materia bariónica (véanse figuras 10 y 11).



Figura 8.

ESPECTRO DE LA CORRELACIÓN ANGULAR, OBTENIDO POR MEDIO DEL SATÉLITE WMAP.

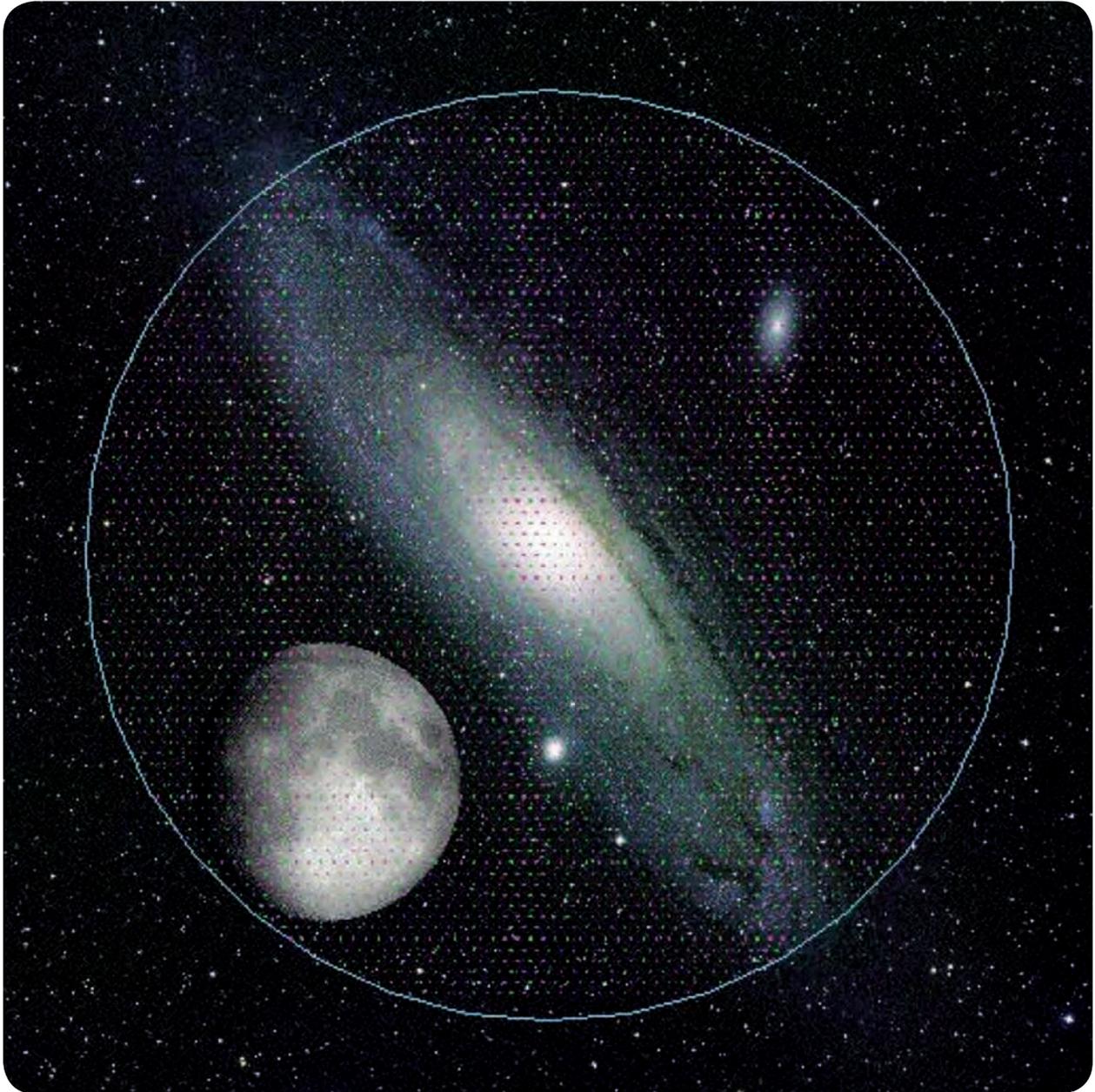


Cortesía del Equipo Científico de la NASA a cargo del Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP).

Esta figura muestra la correlación de temperaturas entre pares de puntos como función de la separación angular entre ellos (el diámetro de la luna subtiende un ángulo de medio grado en estas unidades). El eje horizontal muestra la separación angular entre los puntos considerados (también se puede ver como el momento multipolar que es equivalente al número de áreas independientes en que se puede dividir la bóveda celeste). El eje vertical representa la diferencia promedio de temperaturas entre las parejas de puntos (o áreas) definidas por el eje horizontal. Los puntos son las observaciones y la curva es el ajuste que se obtiene al tomar en cuenta la materia en forma de átomos, la materia oscura y la energía oscura. El primer máximo nos indica cuánto vale la suma de los tres componentes mencionados, y el máximo que sigue a la derecha se debe fundamentalmente a la materia bariónica.



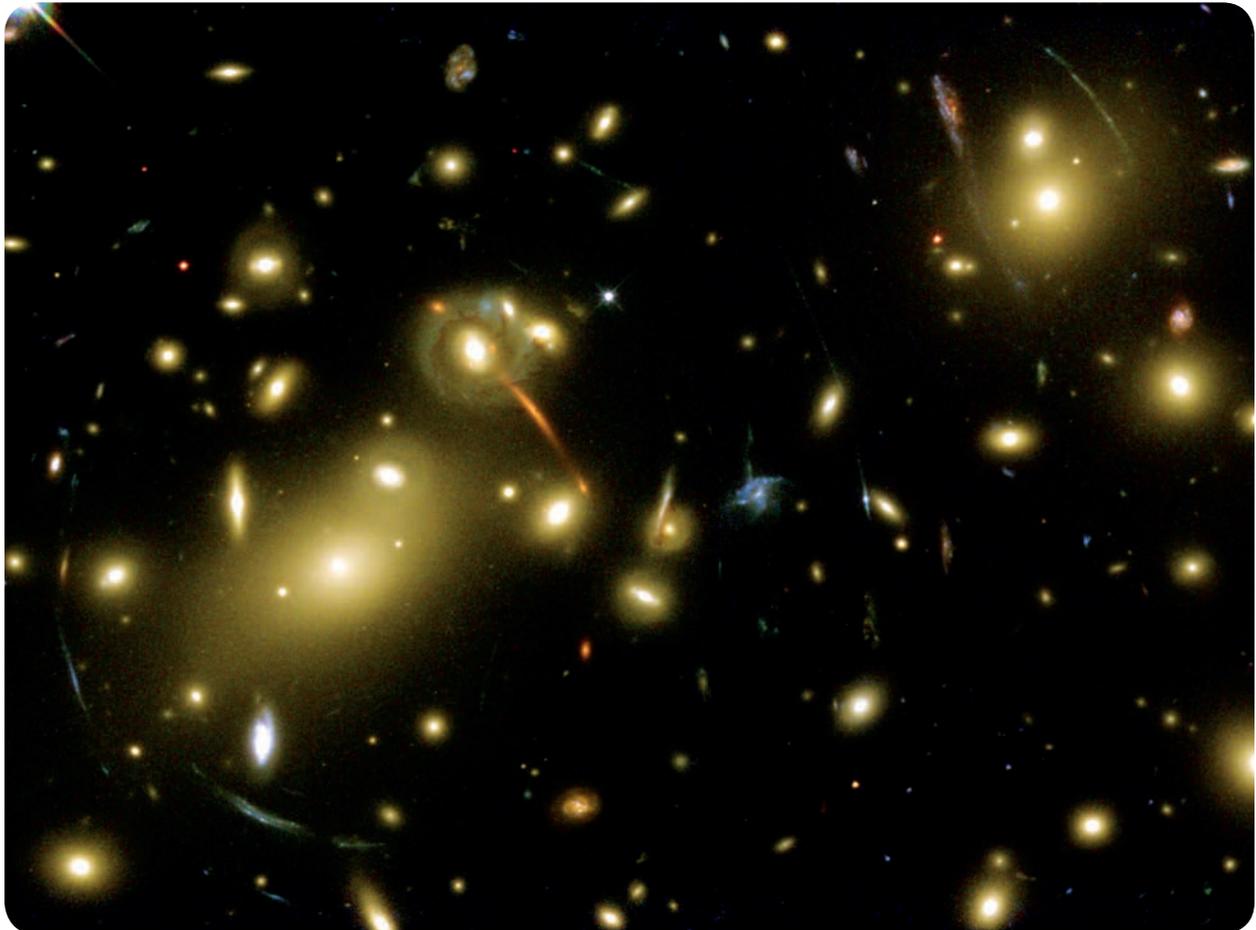
Figura 9.  
GALAXIA DE ANDRÓMEDA.



Para tener una idea de la correlación angular mencionada en la figura anterior, mostramos una imagen de la galaxia de Andrómeda a la cual se le ha superpuesto una imagen de la Luna con la misma escala angular. La Luna y el Sol tienen un diámetro aparente de alrededor de medio grado en la esfera celeste y la galaxia de Andrómeda un poco menos que dos grados en su eje principal. Del horizonte al cenit tenemos un ángulo de 90 grados. De la figura anterior, que se obtiene de la figura 1, se encuentra que para pasar de un máximo a un mínimo en la temperatura nos debemos desplazar alrededor de un grado en la bóveda celeste, este desplazamiento es proporcional al total de la masa del universo en que vivimos.

Figura 10.

CÚMULO DE GALAXIAS MASIVO QUE FUNCIONA COMO UNALENTE DE AUMENTO LLAMADO ÁBELL 2218.



Cortesía de Andrew Fruchter, Sylvia Baggett, Richard Hook, Zoltan Levay y el Instituto Científico del Telescopio Espacial Hubble.

El cúmulo se encuentra a una distancia de 2 mil millones de años luz en la constelación de Draco. El cúmulo es tan masivo que su enorme campo gravitacional desvía los rayos de luz que pasan a través de él, de forma parecida a como una lente óptica desvía los rayos de luz para formar una imagen. Este fenómeno, llamado enfocamiento gravitacional, amplifica, abrillanta y distorsiona las imágenes que se encuentran más lejos que el cúmulo. El enfocamiento gravitacional produce patrones en forma de arco a lo largo de la figura. Los arcos son imágenes distorsionadas de galaxias muy alejadas que se encuentran a distancias de tres a seis veces mayores que el cúmulo de galaxias cercano (la lente gravitacional). El patrón de distorsión de las galaxias lejanas permite determinar la masa total del cúmulo de galaxias cercanas, masa que incluye la materia visible así como la materia oscura.

Figura 11.

ESPECTACULAR DEMOSTRACIÓN DE LA EXISTENCIA DE LAS LENTES GRAVITACIONALES  
NOS LA PROPORCIONA EL OBJETO LRG 3-757.



Cortesía del Instituto Científico del Telescopio Espacial Hubble.

La galaxia amarilla en el centro se encuentra más cerca de nosotros y detrás de ella, a una gran distancia, se encuentra una galaxia azul mucho más joven cuya luz ha sido distorsionada por el campo gravitacional de la galaxia amarilla, y a la que vemos como un círculo azul que rodea a la galaxia amarilla. Este efecto (de amplificación, aumento de brillo y distorsión de la luz) fue predicho por Einstein. El radio del círculo es proporcional al campo gravitacional e implica que la masa de la galaxia amarilla consta de un sexto de materia en forma de estrellas y de gas interestelar, los otros cinco sextos de la masa son materia oscura. La existencia de lentes gravitacionales es un argumento muy importante en favor de la existencia de la materia oscura.

- A partir de las curvas de rotación de galaxias espirales se revela que las partes externas de estas galaxias están dominadas por materia oscura. Probablemente esta materia se deba a dos o tres tipos de partículas elementales que todavía no se descubren.
- A partir de la determinación de las distancias a galaxias muy lejanas, basada en la luminosidad absoluta de las supernovas de tipo I, los grupos dirigidos por Perlmutter, Schmidt y Ries encontraron en 1999 que en lugar de que la expansión del universo se esté desacelerando, al contrario, se está acelerando. Por este resultado los tres astrónomos recibieron el Premio Nobel de Física correspondiente a 2011. La manera más simple de explicar esta aceleración es echar mano de la constante cosmológica que Einstein introdujo en sus ecuaciones del campo en 1917 para obtener un universo estático, esta constante se puede visualizar como una componente de repulsión que hay que agregar a la fuerza gravitacional que es atractiva, componente de repulsión que se vuelve importante a grandes distancias.

A finales de los años veinte del siglo pasado, cuando se encontró que el universo estaba en expansión se dice que Einstein aseguró que la introducción de la constante cosmológica en las ecuaciones del campo había sido el mayor error de su vida, pero resultó que a partir de 1999 se convirtió, por razones distintas a las que Einstein propuso en 1917, en otro de sus grandes aciertos.



# Estructura interna y composición de la Tierra

JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI  
LIGIA PÉREZ CRUZ

## RESUMEN

La Tierra está constituida principalmente por hierro, silicio, oxígeno y magnesio, que representan alrededor de 92% de su masa. La composición está asociada a la estructura interna y ésta a su vez está relacionada con el origen y evolución del sistema solar. La estructura interna se caracteriza por capas que forman la corteza, manto y núcleo metálico. El manto está formado por silicatos de magnesio y el núcleo principalmente por hierro y aleaciones hierro-níquel. El manto está formado por el manto superior, la zona de transición y el manto inferior. El núcleo está formado por un núcleo externo fluido y uno interno sólido con alta rigidez. La capa externa de la corteza está constituida por oxígeno, silicio, aluminio y hierro, que constituyen 88% de su masa. Los minerales más comunes que forman las rocas de la corteza son alrededor de 22, que contrastan con la diversidad de los minerales identificados. Los estudios de la concentración, distribución y propiedades de elementos y minerales presentes en bajas proporciones son críticos para entender la constitución y evolución del planeta. En particular, las investigaciones acerca de elementos refractarios, volátiles, litófilos, siderófilos, isótopos estables y radioactivos aportan la información básica para investigar el sistema planetario. Los estudios sobre la composición de la Tierra se relacionan con los procesos de diferenciación, formación de núcleos metálicos, estructura interna, fuentes de energía, mecanismos de disipación de calor, geodinámica y tectónica de placas, plumas y convección en el manto, formación y evolución de las cortezas continental y oceánica, origen y evolución del campo geomagnético y la formación de la atmósfera y los océanos.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los atractivos en las salas de los museos de historia natural, geología y mineralogía son las colecciones de rocas y minerales. Los minerales se caracterizan por una amplia variedad de formas, texturas, composición y colores, que ilustran la diversidad de procesos de formación, composición, estructura química e historias geológicas. El interior y la superficie de la Tierra están constituidos por diversas rocas y minerales. La Tierra se distingue de otros cuerpos en el sistema solar por tener agua líquida en su superficie y una atmósfera densa, así como por los procesos tectónicos y magmáticos (véase figura 1). Las rocas y los minerales son componentes importantes en los diferentes ciclos que conectan los distintos subsistemas del sistema Tierra. Uno de los retos para estudiar geociencias es aprender a conocer y distinguir las diferentes clases de rocas y minerales y entender los procesos y condiciones de formación (véase figura 2). En este contexto de una amplia diversidad en los tipos de minerales y rocas, sorprende que los estudios sobre la composición de la Tierra nos presentan un panorama de aparente simplicidad, en el que la composición puede resumirse con unos cuantos elementos, hierro, oxígeno, silicio y magnesio, que representan alrededor de 92% del planeta (véase figura 3), constituido por un núcleo de hierro y un manto de silicatos de magnesio.

La capa superficial de la corteza, en donde se observa la diversidad mineralógica y en donde se esperaría una mayor complejidad, está constituida por oxígeno, silicio, aluminio y hierro, que representan 88% de la corteza. Si a ellos añadimos cuatro más, calcio, sodio, potasio y magnesio tenemos alrededor de 99% de la corteza (véase figura 4). La corteza está conformada por las cortezas continental y oceánica, formadas por rocas silicatadas, ricas en elementos litófilos, provenientes de material del manto por procesos de diferenciación y productos de la tectónica de placas y convección del manto. De la diversidad de minerales, con más de 3 mil tipos, alrededor de 22 son los minerales más comunes que constituyen las rocas de la mayor parte de la corteza. Esta aparente simplicidad en la composición y estructura de la Tierra está ligada a su origen y evolución.

La estructura interna de la Tierra y otros cuerpos diferenciados, se caracterizan por núcleos metálicos y por mantos y cortezas de silicatos (véase figura 5). Los estudios de su composición, densidad y propiedades proporcionan la información básica para entender los mecanismos de evolución de los sistemas planetarios. Por otro lado, los análisis de elementos y minerales presentes en cantidades menores, comparados con aquellos que forman la mayor parte de la masa del planeta, aportan información crítica para investigar los procesos de formación y evolución. Su estudio constituye un componente importante para determinar la composición de la Tierra y del sistema solar. Entre ellos, los estudios de los elementos refractarios, volátiles, isótopos y elementos traza, aportan evidencias sobre los diferentes procesos

de acreción, diferenciación, metamorfismo y alteraciones sobre los constituyentes iniciales presolares en la nebulosa planetaria.

En este capítulo, como parte del simposio multidisciplinario e interdisciplinario sobre la química, abordamos la composición y estructura de la Tierra.

La Tierra forma parte del sistema solar, su formación y evolución están ligadas a la formación y evolución del sistema planetario. Los estudios en este contexto incluyen análisis de meteoritos y muestras lunares, así como observaciones y mediciones de las misiones planetarias. La geoquímica abarca un amplio espectro de temas en relaciones e implicaciones con los procesos geológicos, geodinámica, tectónica de placas, estructura interna y ciclos e interrelaciones del sistema Tierra.

Figura 1.

VISTA DE LA TIERRA DESDE EL ESPACIO. EL PLANETA SE CARACTERIZA POR UNA SUPERFICIE DINÁMICA CON CORTEZA CONTINENTAL Y OCEÁNICA, PRESENCIA DE AGUA LÍQUIDA EN SUPERFICIE Y LA ATMÓSFERA.



Figura 2.

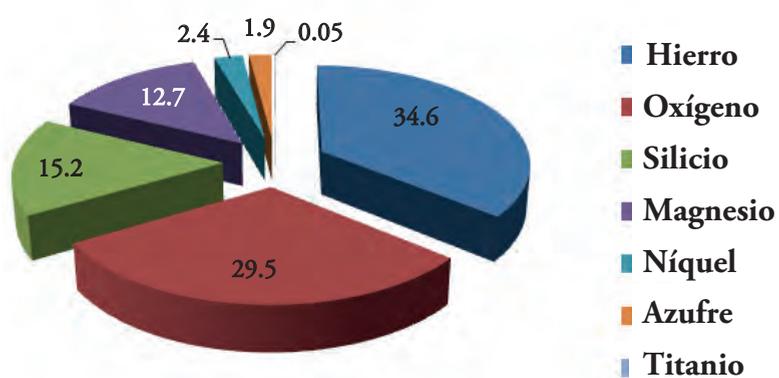
IMÁGENES DE MINERALES, ILUSTRANDO LA DIVERSIDAD DE COMPOSICIONES, FORMAS Y TEXTURAS.



Tomadas de la colección Dr. V. Malpica, Museo de Geología, UNAM.

Figura 3.  
ELEMENTOS QUE COMPONEN LA TIERRA.

### Composición (%)



### Estructura interna de la Tierra

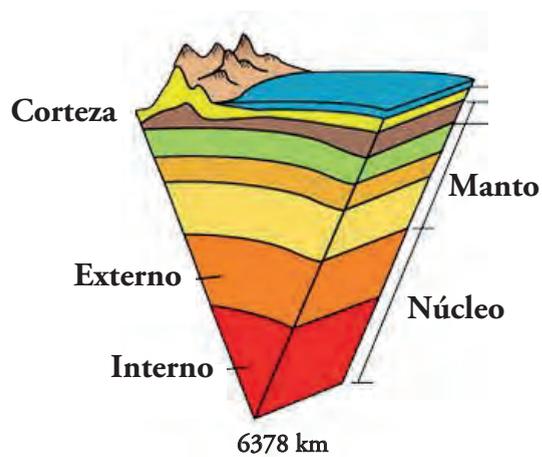
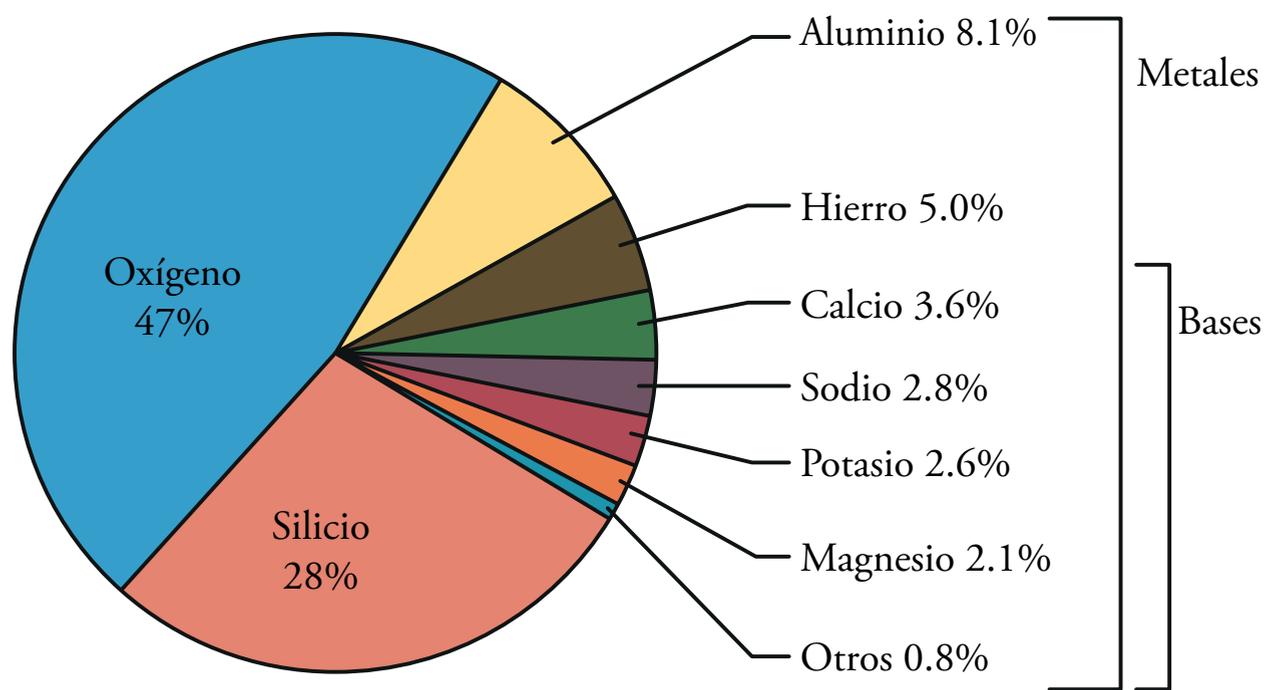
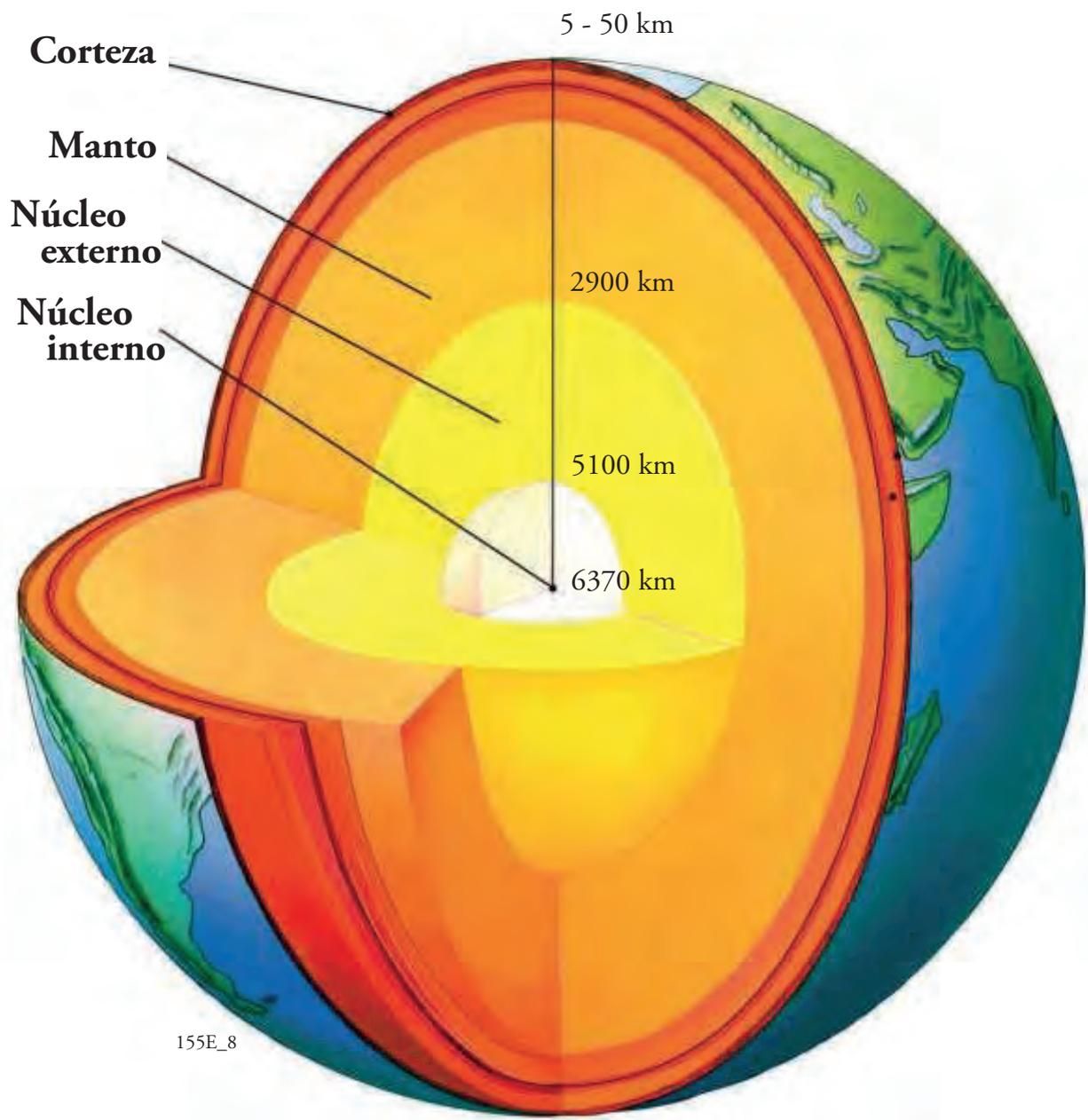


Figura 4.  
ELEMENTOS QUE COMPONEN LA CORTEZA TERRESTRE.



© John Wiley & Sons, Inc.

Figura 5.  
ESQUEMA SIMPLIFICADO DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA.



## SISTEMA SOLAR

El Sol y el sistema planetario se forman a partir de las nubes de gas y polvo de las nebulosas planetarias. La composición, propiedades y estructura de estas nebulosas están siendo analizadas cada vez con mayor resolución y precisión a través de diferentes métodos y modelados, que documentan las similitudes y diferencias entre nebulosas y las variaciones internas a diferentes escalas. Adicionalmente, los estudios recientes sobre exoplanetas y sistemas planetarios alrededor de otras estrellas en la Vía Láctea, en distintas etapas de evolución, proveen un contexto especialmente interesante en el cual se enmarcan las investigaciones sobre las nebulosas y formación de sistemas planetarios.

Los modelos de formación de sistemas planetarios involucran el colapso de nubes de gas y polvo asociados a la interacción gravitacional con otras estrellas o explosión de supernovas cercanas. En el sistema solar con la formación del proto-sol, mecanismos de agregación formaron los primeros sólidos. Entre estos materiales, se tienen preservadas las inclusiones de calcio y aluminio (CAI, por sus siglas en inglés) y los cóndrulos, objetos submilimétricos compuestos de silicatos que documentan calentamientos y enfriamientos rápidos en la nebulosa. Análisis de cóndrulos e inclusiones han documentado presencia de fragmentos de cóndrulos en las inclusiones, fragmentos de inclusiones en cóndrulos y cóndrulos fragmentados, que indican procesos dinámicos con colisiones, agregaciones, fragmentación, transporte, selección, etc. Agregaciones de cóndrulos e inclusiones refractarias en matrices de polvo silicatados dan origen a pequeños cuerpos, que incrementan sus tamaños con colisiones para formar cuerpos de mayores dimensiones, hasta de varios kilómetros, con los planetesimales. Los procesos de colisión resultan además en la desintegración, modificaciones o crecimiento de cuerpos de mayor tamaño.

Un componente importante de información sobre el origen y las etapas tempranas de evolución proviene de los estudios de los meteoritos (véanse figura 6 y 7). En particular sobre las condritas (figura 6), que representan materiales no afectados sustancialmente por calentamiento y metamorfismo, y que retienen sus estructuras y composiciones iniciales. La preservación de los cóndrulos, y de las CAI, es parte de la evidencia que apoya que las condritas no fueron afectadas por el calentamiento a partir de su formación.

Figura 6.

(A) FRAGMENTO DE LA CONDrita ALLENDE, MOSTRANDO LOS CÓNDRULOS, LAS INCLUSIONES DE CALCIO Y ALUMINIO Y MATRIZ. (B) IMÁGENES DE MICROSCOPIA DE LOS CÓNDRULOS ILUSTRANDO LA DIVERSIDAD DE TEXTURAS, MORFOLOGÍAS Y MINERALOGÍA.

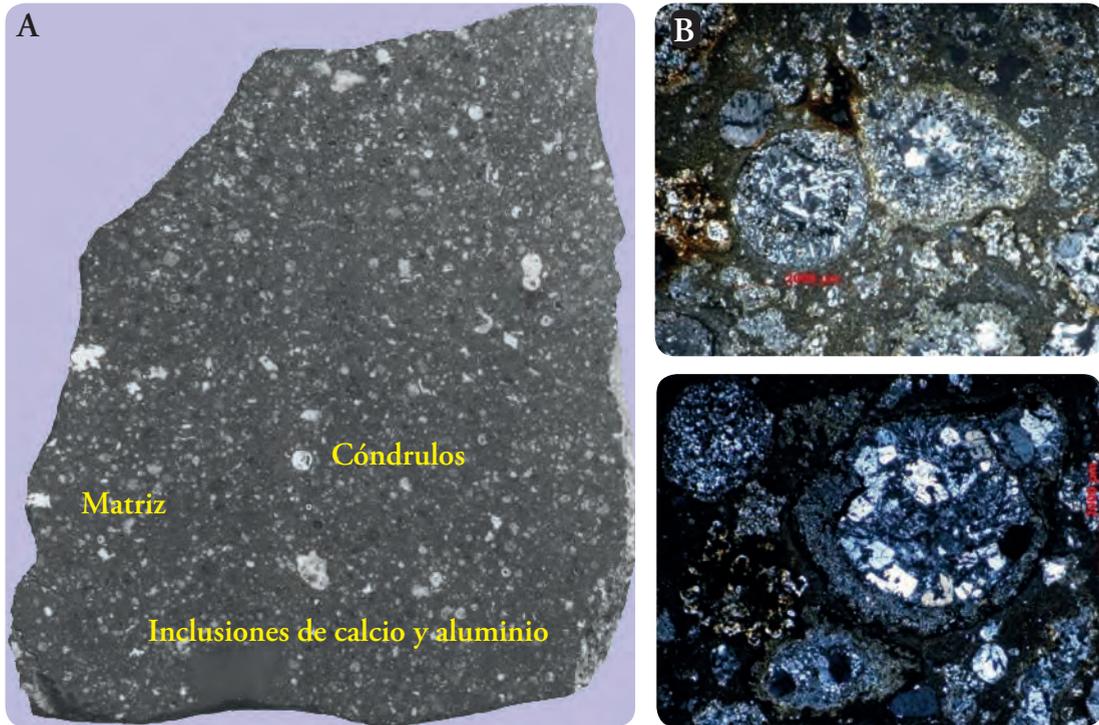


Figura 7.

IMAGEN DE UN METEORITO METÁLICO.



Colección Palacio de Minería, UNAM.

## METEORITOS

Los meteoritos contienen registros de la evolución del sistema solar y de la composición de la nebulosa y se caracterizan por diferentes mineralogías, texturas y estructuras. Los meteoritos constituyen los materiales formados en las etapas tempranas y se caracterizan por conservar sus composiciones iniciales: meteoritos primitivos y diferenciados. Se tienen dos grandes grupos de meteoritos, los metálicos y los pétreos, que documentan los cuerpos fuente de donde provienen y que fueron desintegrados en colisiones. Adicionalmente, se tienen los meteoritos compuestos por hierro y silicatos, cuya procedencia se adscribe a las zonas de transición entre el manto y el núcleo de los planetesimales.

Se han identificado diferentes clases de meteoritos, marcadas por variaciones en los contenidos de elementos refractarios, cociente de elementos litófilos a siderófilos, estados de oxidación, isótopos de oxígeno y elementos volátiles. Las diferentes clases estarían asociadas a diferentes cuerpos planetarios y las diferencias composicionales reflejan variaciones locales en la nebulosa, en contenidos relativos de gas y polvo, procesos de turbulencia y mecanismos de acreción.

Por su composición y procedencia, los meteoritos se clasifican en no diferenciados o primitivos y diferenciados. Entre los no diferenciados se tienen las condritas y acondritas primitivas. Entre los grupos de meteoritos diferenciados se tienen la achondritas, angritas, aubritas, howarditas-diogenitas-eucritas, mesosideritas, palasitas y los metálicos (Weisberg *et al.*, 2006).

Las condritas representan los materiales primitivos preservados de las etapas iniciales, lo cual es apoyado por la similitud de la composición química elemental con la estimada para la corona solar, excepto por los elementos volátiles que se relacionan con el grado de volaticidad en la nebulosa. Se han identificado diferentes clases de condritas, de las cuales las condritas ordinarias son las más abundantes, representando alrededor de 80 a 85% de las caídas (meteoritos cuyo ingreso en la Tierra es observado). Entre los diferentes grupos (clases) se tienen: ordinarias (H, L y LL), carbonáceas (CB, CH, CI, CK, CM, CO, CR y CV), enstatitas (EH y EL), R y K. En general, las composiciones químicas son similares a la solar, en particular para las condritas clase CI caracterizadas por olivinos y piroxenos con bajos contenidos de cóndrulos.

Los estudios en condritas incluyen caracterización de cóndrulos, inclusiones, partículas metálicas y matriz. Las condritas se caracterizan por variaciones en las proporciones de hierro metálico reducido y oxidado en silicatos y óxidos. Se tienen dos poblaciones de cóndrulos: tipo I, bajos en FeO con olivinos y partículas metálicas y tipo II, oxidados sin partículas de metal. La formación de magnetita en condritas reducidas y oxidadas refleja condiciones y mecanismos en la nebulosa y de diferenciación en los planetesimales. Los subgrupos de condritas CV presentan

proporciones variables de magnetita y metal. En el caso de la condrita Allende, ésta se caracteriza por cóndrulos tipo I.

Los modelos para la formación de los planetas involucran agregación y colisiones de cuerpos de tamaños menores, que construyeron eventualmente cuerpos más grandes. Estudios recientes documentan que la agregación de planetesimales ocurre en las etapas tempranas, con la formación de cuerpos diferenciados con núcleos metálicos (Kleine *et al.*, 2002). La formación de planetesimales y planetas es característica de las nebulosas planetarias (Johansen *et al.*, 2007). Los procesos dinámicos y colisiones de gran escala resultaron en la desintegración de planetesimales y planetas iniciales; los cuales constituyen los cuerpos fuente de las diferentes clases de meteoritos. En los modelos de acreción la composición global es similar a la solar, excepto en los elementos volátiles. En estos modelos iniciales la composición de la Tierra es condrítica, formada por la agregación de estos materiales primitivos y no es afectada sustancialmente por procesos de diferenciación, agregación de material por colisiones o fusión parcial. Estudios recientes indican diferencias con los modelos condríticos, en los cuales se tienen composiciones iniciales distintas, más compatibles con la clase de las enstatitas (Campbell y O'Neill, 2012).

#### ESTRUCTURA INTERNA Y GEODINÁMICA

La Tierra tiene una densidad media de  $5.5 \text{ kg/m}^3$  y una forma aproximada a un elipsoide de revolución con un radio medio de alrededor de 6 mil 370 km. La densidad media es más alta que las densidades en las rocas de la corteza (continental alrededor de  $2.7 \text{ kg/m}^3$  y marina alrededor de  $2.9 \text{ kg/m}^3$ ), indicando que en el interior se tienen materiales de mayor densidad. Ésta es parte de la evidencia para la presencia de un núcleo metálico, que representa casi un tercio de la masa del planeta, constituido principalmente por hierro y aleaciones hierro-níquel. El núcleo metálico está dividido en dos partes con propiedades distintas, una externa fluida con viscosidades bajas y densidades de  $10\text{-}12 \text{ kg/m}^3$  y una interna con una alta rigidez y densidades de  $\sim 13 \text{ kg/m}^3$ . El núcleo tiene un radio de  $\sim 3488 \text{ km}$  y el núcleo interno tiene un radio de  $\sim 1230 \text{ km}$ . El manto representa alrededor de 82% del volumen del planeta y está compuesto de silicatos de magnesio. Se divide en tres zonas: manto superior ( $< 400 \text{ km}$ ), zona de transición ( $400\text{-}670 \text{ km}$ ) y manto inferior ( $670\text{-}2900 \text{ km}$ ). El manto inferior representa casi 49%, constituyendo el componente principal. La frontera entre el manto inferior y el núcleo externo corresponde a la capa D", que presenta espesores entre 100 y 200 km. La capa D" ha sido interpretada en términos de la frontera térmica del manto convectivo, con un alto gradiente de temperatura o en forma alternativa como una capa

composicionalmente distinta asociada a la diferenciación. La capa presenta un gradiente bajo de velocidades con alta variación lateral, indicando heterogeneidades o anisotropía. La frontera inferior presenta relieve, de hasta 5 km, posiblemente relacionado con la convección del núcleo.

Caracterizar los minerales en el manto y núcleo es parte de los retos en los estudios de física del interior, en los que se han tenido avances recientes. Los minerales en el manto representan diferentes fases y polimorfos de silicatos de magnesio. En el manto superior se tienen olivinos, piroxenos y granates y en la zona de transición espineles y majorite. Entre los avances está la identificación de la perovskite en el manto y recientemente, en 2001, la fase de alta presión post-perovskite en la capa D". Esta capa es la zona de transición que separa al núcleo fluido convectivo del manto inferior, que presenta presiones y temperaturas del orden de 135 giga-Pascales y 3500-4000 °C con gradientes altos de temperatura y variaciones en la velocidad de ondas sísmicas. La formación de la capa, variaciones espaciales y temporales, plumas calientes, presencia de litosfera oceánica en las etapas iniciales de evolución en el Precámbrico, anisotropías y mecanismos de diferenciación son parte de las interrogantes bajo estudio (Murakami *et al.*, 2004; Hirose, 2006).

Los estudios de variación de propiedades físicas han permitido documentar las variaciones con profundidad de la densidad, temperatura, velocidad de transmisión de ondas sísmicas, parámetros elásticos y conductividad eléctrica (véase figura 9). Esto permite caracterizar las propiedades de las distintas capas y las variaciones con la profundidad, que implican presiones y temperaturas altas. Los datos con profundidad permiten analizar los procesos de las capas, tales como los mecanismos de convección en el manto, plumas calientes, subducción de placas y esparcimiento de corteza oceánica, de diferenciación en la capa D" de transición en la frontera manto-núcleo y de convección en el manto y núcleo externo. Análisis de propagación de ondas sísmicas documentaron la ausencia de ondas de corte S para ciertas regiones, que registran la presencia del núcleo externo fluido. La resolución espacial y temporal de los estudios se ha incrementado en los últimos años con las redes instrumentales globales, capacidad de cómputo, nuevos algoritmos y métodos de procesado y modelado. Las imágenes de tomografía en el manto permiten documentar variaciones en temperatura, asociados a la subducción, plumas calientes y convección, cada vez con mayor precisión.

La caracterización de los minerales constituyentes en las distintas capas es un problema complejo debido a los efectos de las altas temperaturas y presiones. Los estudios sobre la composición y estructura interna hacen uso de análisis de meteoritos y xenolitos de corteza inferior y manto, modelos teóricos y experimentales y observaciones geofísicas. Entre los hallazgos recientes se tiene la identificación del silicato de magnesio que forma el manto y fue caracterizado en un meteorito. Los modelos experimentales empleando láseres ofrecen la oportunidad de alcanzar presiones y temperaturas comparables al manto inferior y núcleo.

Figura 8.

COMPOSICIÓN DE LA CORONA SOLAR EN FUNCIÓN DE LA COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LA CONDRIITA ALLENDE.

### Sistemas planetarios – Condritas carbonosas

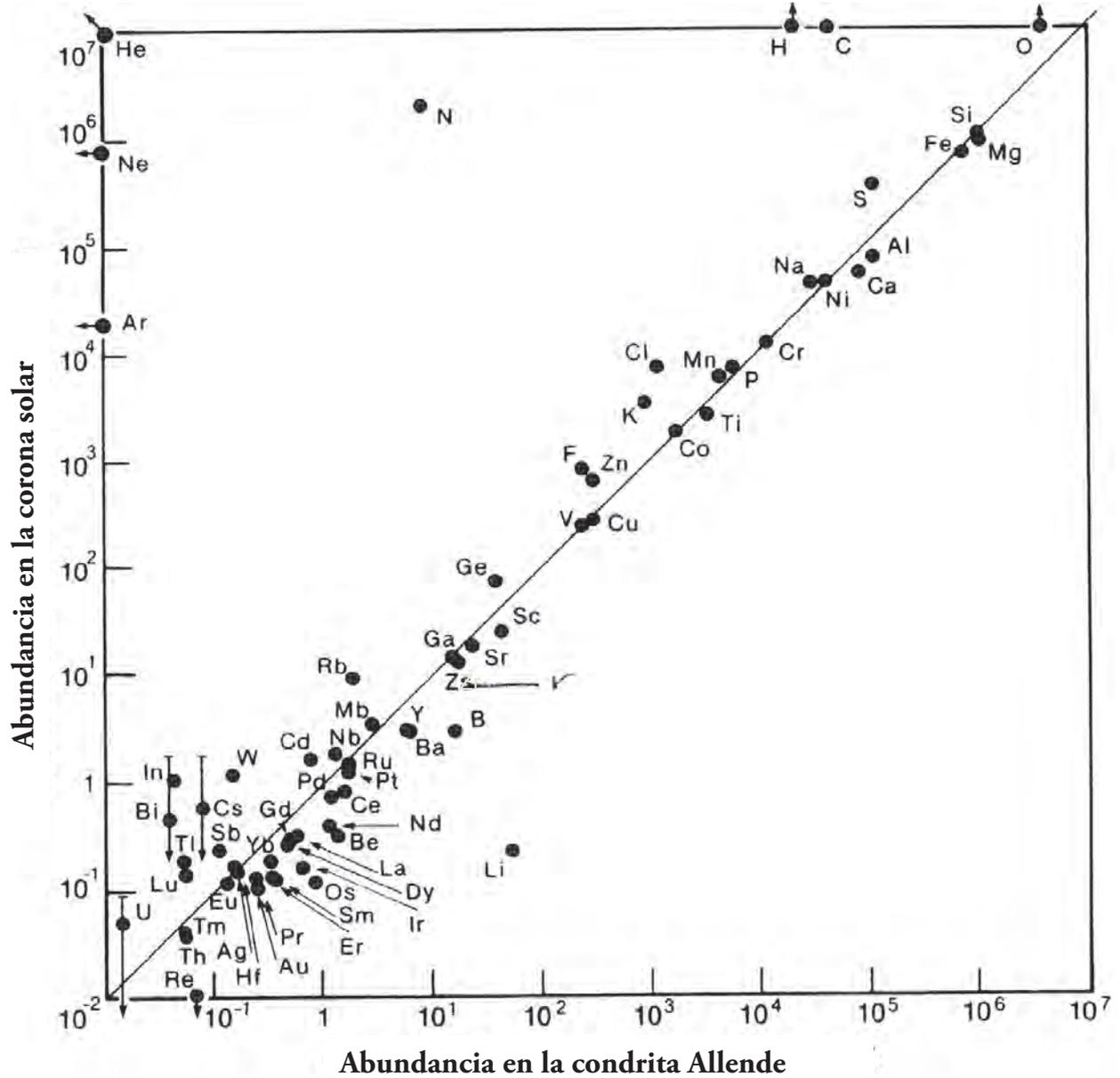
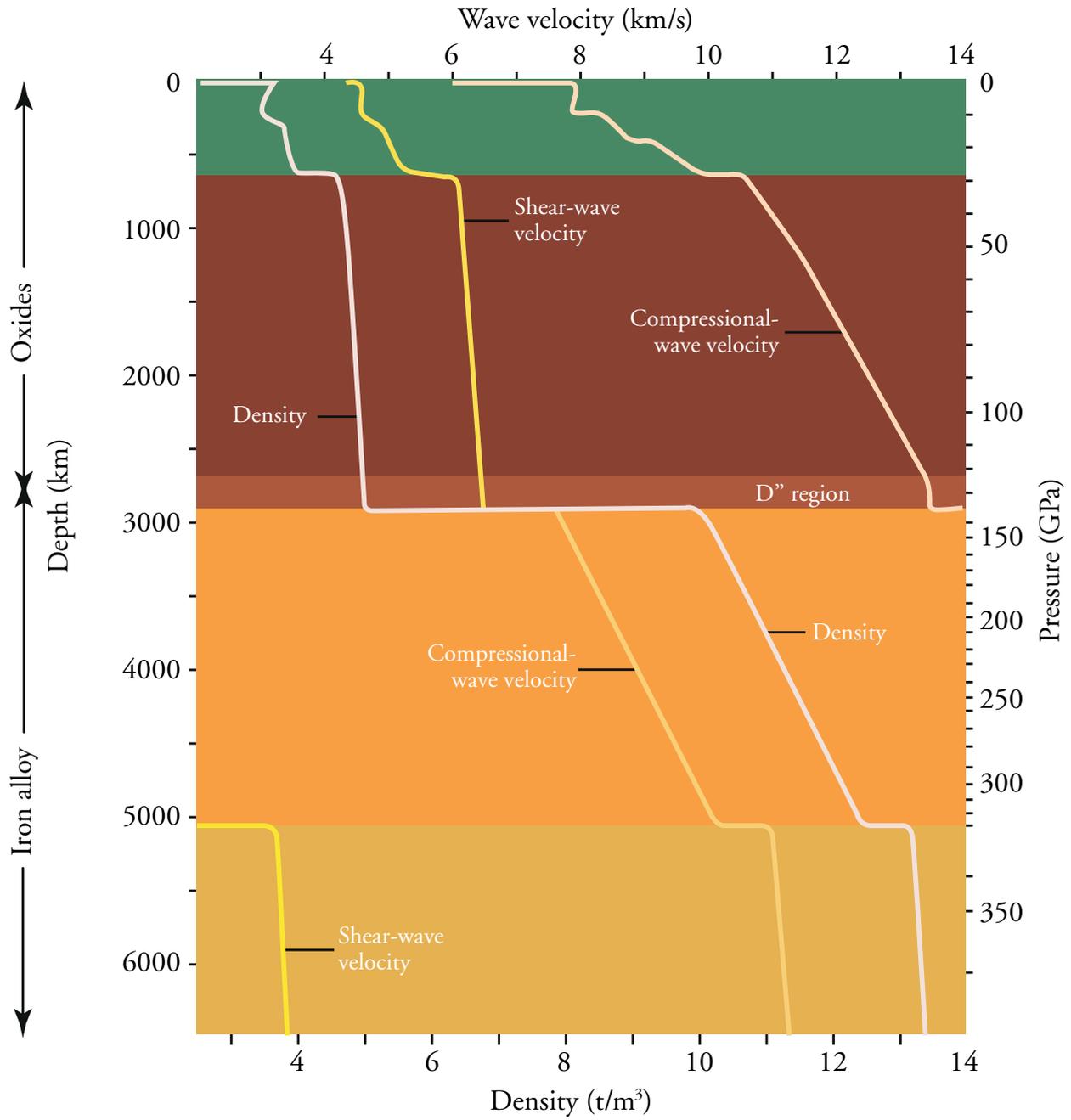


Figura 9.

VARIACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD EN EL INTERIOR DEL PLANETA.



## DISCUSIÓN Y COMENTARIOS

Si bien unos cuantos elementos constituyen la mayor parte de la masa del planeta y un grupo pequeño de minerales son los principales componentes en las rocas de la corteza, la presencia, proporciones, distribución y arreglos mineralógicos de los elementos menos abundantes son componentes importantes en la formación y evolución del sistema planetario y su estudio es crítico para entender su evolución. La información sobre los diferentes mecanismos y condiciones en la nebulosa proviene de los estudios isotópicos, elementos trazas, distribuciones de elementos refractarios y volátiles, elementos siderófilos y litófilos, etc. A escala del sistema, los elementos que forman los planetas y otros cuerpos fueron formados por procesos estelares previos y constituyen una proporción pequeña del orden de 2% en la nebulosa solar, ya que el sistema está compuesto principalmente por hidrógeno y helio que forman al Sol.

La determinación de la composición química de la Tierra, de otros planetas y satélites ha permanecido como una de las interrogantes mayores en la investigación del sistema solar. Allegre *et al.* (1995) comentan que determinar la composición permite acotar muchos de los problemas en geofísica y geoquímica, que incluyen los modelos de diferenciación de la corteza continental, la estructura y convección en el manto y la naturaleza y propiedades del núcleo. Las propuestas y modelos iniciales partieron de los modelos de formación del Sol y la evolución de la nebulosa planetaria, asumiendo la acreción de planetesimales con composición condritica.

Los primeros sólidos preservados son las inclusiones refractarias CAI y los cóndrulos. Los cóndrulos y CAI proporcionan las edades más antiguas de la formación del sistema, con edades de alrededor de 4 mil 568 Ma. Los cóndrulos, silicatos fundidos y enfriados en tiempos cortos, presentan formas semiesféricas y tamaños submilimétricos y son los constituyentes principales de los meteoritos condriticos. Las diferentes clases de condritas se caracterizan por cocientes variables de Ca/Si y Al/Si, asociados a las temperaturas de condensación de estos elementos. Las condritas clase CV, como el Allende, presentan los cocientes más altos, mientras que las clase CI, que presentan composiciones similares a la solar tienen cocientes intermedios. La composición media del manto correlacionan con la composición de condritas CI, incluyendo a los elementos refractarios y litófilos moderadamente volátiles y volátiles. Los modelos de acreción con condensación selectiva implican formación de cuerpos con silicatos y metales en las zonas cercanas al Sol y formación de cuerpos ricos en gases y compuestos de hidrógeno y oxígeno en zonas lejanas, con un gradiente de temperaturas de condensación.

La secuencia y cronología de eventos en las etapas tempranas ha sido difícil de establecer. En el diagrama de la figura 10 se presenta un resumen de los diferentes

procesos, en el cual se tiene la formación de inclusiones, acreción y formación de planetesimales diferenciados con núcleos metálicos y de cóndrulos en un periodo corto de entre 4 y 6 Ma luego de la formación del protosol. Los estudios recientes documentan formación de inclusiones y cóndrulos en forma contemporánea y cierto traslape en las regiones, incluyendo las matrices de silicatos (Itoh y Yurimoto, 2003). La presencia de isótopos de aluminio en los planetesimales contribuyó al proceso de diferenciación. En algunos de estos cuerpos se tiene evidencia de campos magnéticos internos, incluyendo el cuerpo fuente de la condrita Allende (Carporzen *et al.*, 2011). La acreción de cuerpos de diferentes tamaños permitió la formación de los primeros planetas y los cuerpos fuente de condritas, angritas, eucritas y metálicos. Las colisiones entre los cuerpos resultó en la desintegración de varios de ellos (véase figura 11), lo que explica la distribución de meteoritos primitivos y diferenciados, dependiendo de los niveles corticales, manto o núcleo de las zonas de proveniencia (Elkins-Tanton *et al.*, 2011; Weiss y Elkins-Tanton, 2013).

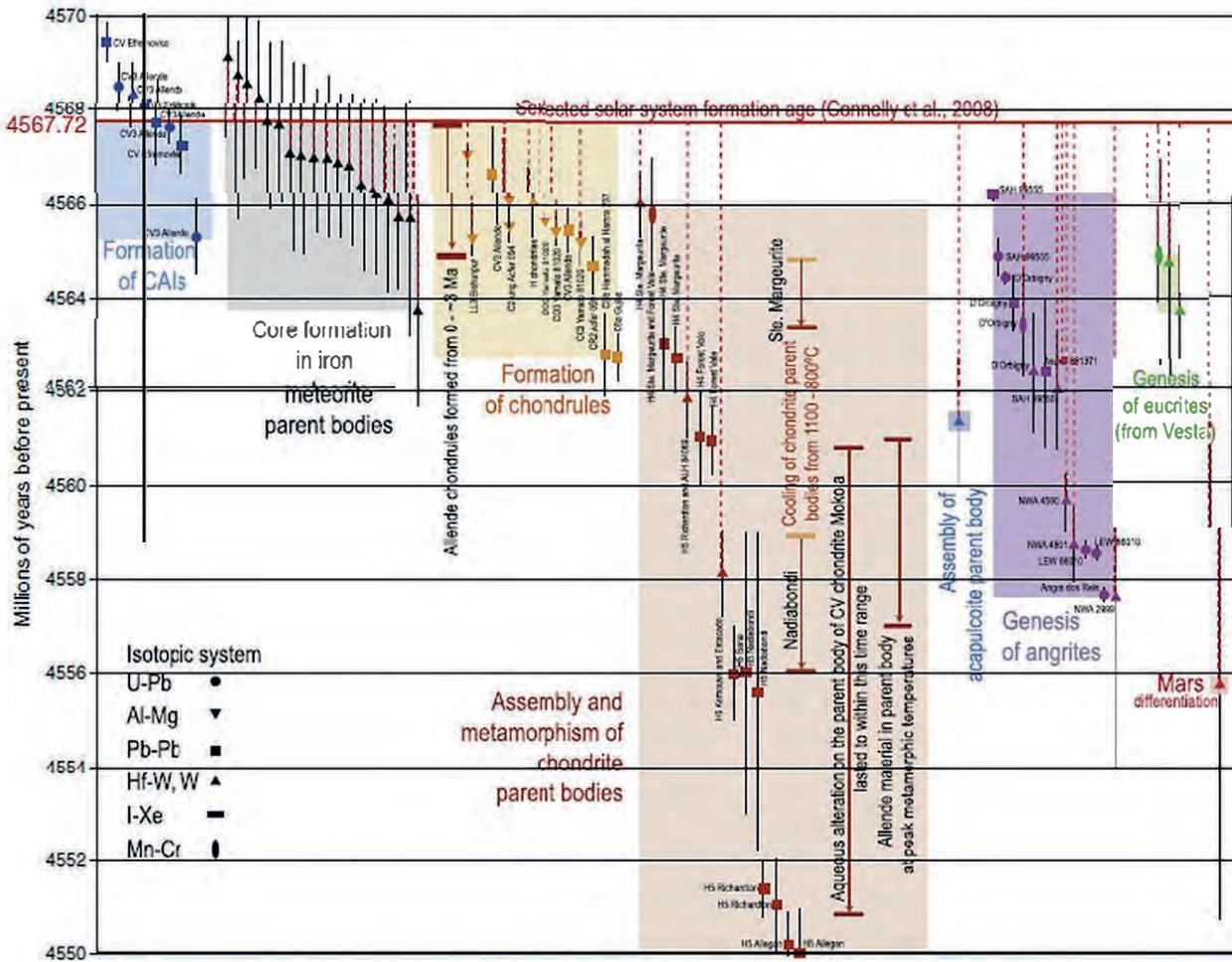
En el caso de la Tierra, hacia la etapa final de solidificación y segregación del núcleo metálico, la colisión con otro cuerpo del tamaño del planeta Marte resultó en la fusión parcial y desarrollo del sistema Tierra-Luna. El núcleo metálico del cuerpo impactor se agregó al núcleo terrestre y los materiales de silicatos de los dos cuerpos se re-distribuyeron permitiendo la formación del satélite (Canup y Auspaug, 2001). Las condiciones de presión-temperatura en el manto resultó en la formación de un océano de magma en el manto inferior. La cristalización de los silicatos en el manto inferior eventualmente alteró las condiciones de oxidación/reducción y disminuyó el proceso de segregación del núcleo. En los siguientes millones de años, la colisión con otros planetesimales diferenciados permitió que el planeta incrementara su masa y que el núcleo continuara desarrollándose (Wood, 2011). Los impactos con planetesimales continuaron por un periodo largo del orden de unos 100 Ma.

Recientemente, empleando combinaciones de diferentes técnicas y datos geoquímicos e isotópicos se han propuesto modelos de mecanismos capaces de modificar sustancialmente la composición inicial y modelos no-condríticos de acreción planetaria. Campbell y O'Neil (2012), en su análisis de alternativas no-condríticas a los modelos y datos de acreción y composición, analizan modelos de modificación de composiciones iniciales condriticas entre los que destacan mecanismos de diferenciación (corteza, manto y núcleo) y de erosión por colisiones.

Los modelos de composición inicial del manto y efectos de procesos de diferenciación y evolución han incrementado su resolución espacial y temporal como resultado de los estudios de tomografía, convección, plumas calientes, subducción, propiedades físicas y mecanismos de desgasificación. Los estudios presentan limitaciones e incertidumbres, entre ellas composición inicial (condrítica o enstatitas), efectos de colisiones y erosión/agregación de materia, contenidos de volátiles y mecanismos de desgasificación.

Figura 10.

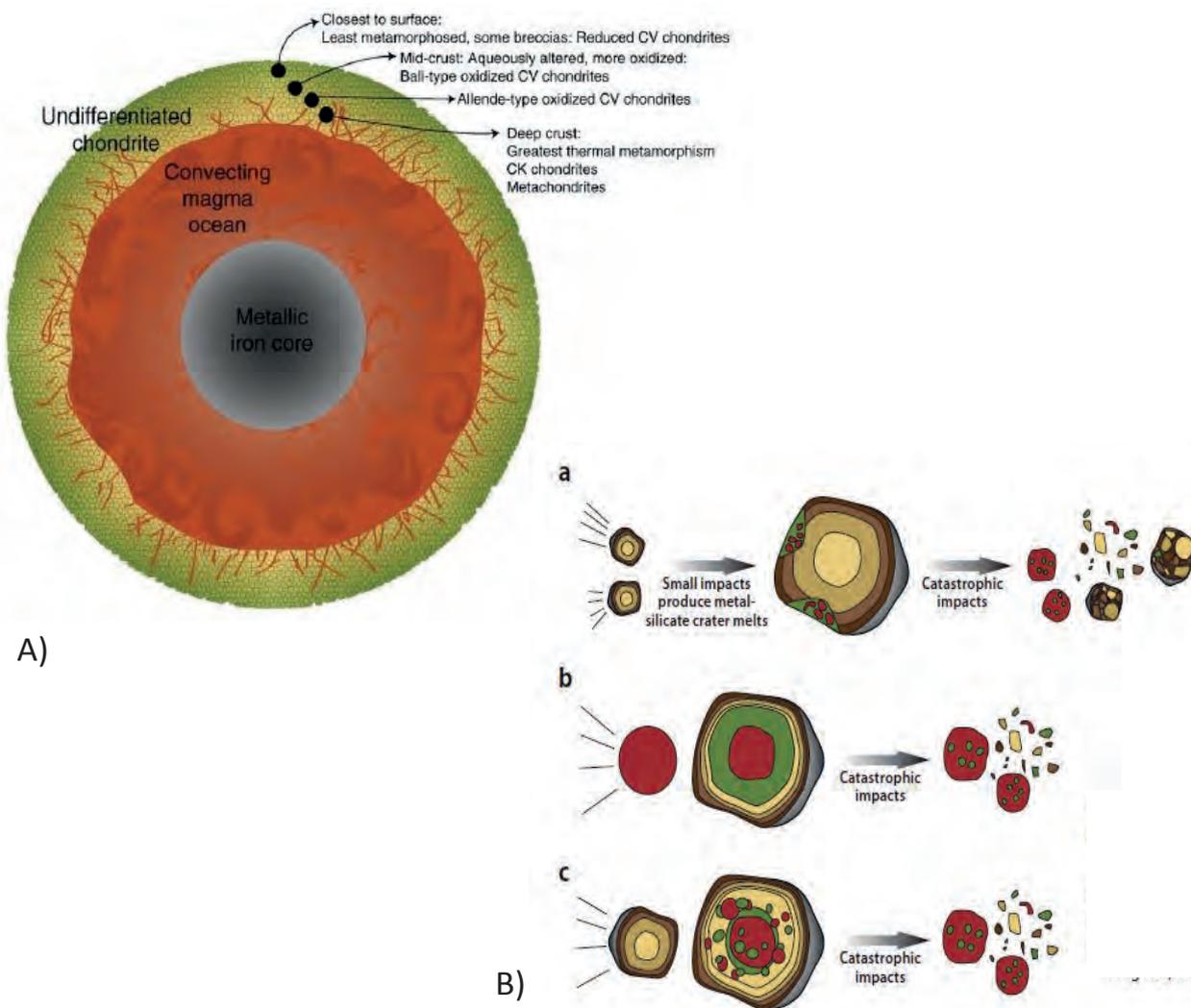
DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE LA ETAPA DE EVOLUCIÓN TEMPRANA DE LA TIERRA, INDICANDO LA SECUENCIA Y CRONOLOGÍA DE FORMACIÓN DE CAI, CÓNDRULOS, PLANETESIMALES DIFERENCIADOS CON NÚCLEOS METÁLICOS, PLANETESIMALES FUENTE DE LOS METEORITOS CONDRICTICOS, ANGRITAS, EUCRITAS Y PLANETAS.



Tomada de Elkins-Tanton *et al.*, 2011.

Figura 11.

(A) DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE PLANETESIMALES DIFERENCIADOS CON NÚCLEO METÁLICO, ILUSTRANDO EN PARTICULAR EL CASO DEL PLANETA FUENTE DE METEORITOS CONDRÍTICOS CLASE CV. EL ALLENDE SE ORIGINA DE LA CORTEZA DEL MANTO SILICATADO. (B) DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE DIFERENTES CLASES DE COLISIONES, ILUSTRANDO LA FORMACIÓN DE METEORITOS DIFERENCIADOS E INDIFERENCIADOS.



A: Tomada de Elkins-Tanton *et al.*, 2011. B: Tomada de Weiss y Elkins-Tanton, 2013.

Las disciplinas de mineralogía y petrología representan campos activos de investigación, en expansión y transformación, con nuevos hallazgos y desarrollos teóricos y experimentales. Las rocas y minerales son los materiales que forman la Tierra y otros planetas, satélites, asteroides y cometas en el sistema solar. Las rocas y minerales son los materiales empleados en las diferentes actividades de las sociedades, como materiales de construcción y en la industria. El desarrollo de las sociedades ha estado ligado a la exploración y explotación de recursos minerales (y energéticos). Algunas rocas y minerales han sido de particular importancia, marcando las edades de piedra, cobre, bronce y hierro, a lo largo de la historia. Estos y muchos otros minerales han sido parte de los recursos estratégicos para el desarrollo de las culturas y de las naciones modernas.

Los estudios sobre la composición de la Tierra son componentes críticos para entender el origen y la evolución del sistema solar y están relacionados con las mayores interrogantes sobre los procesos de diferenciación, formación del núcleo metálico y estructura interna, fuentes de energía, mecanismos de disipación de calor, tectónica de placas, plumas y convección en el manto, formación y evolución de la corteza continental y oceánica, origen y evolución del campo geomagnético, origen de la atmósfera y océanos y origen y evolución de la vida.

Los estudios de propiedades físicas de las diferentes capas documentan la presencia de un núcleo externo fluido, caracterizado por bajas viscosidades y con convección interna, y un núcleo interno, caracterizado por una alta rigidez.

## CONCLUSIONES

La Tierra está constituida principalmente por hierro, silicio, oxígeno y magnesio, que representan alrededor de 92% de su masa. Con la adición de níquel, azufre y titanio se tiene más de 99%. La constitución está asociada a la estructura interna y éstas a su vez están relacionadas con el origen y evolución del sistema solar. La estructura interna se caracteriza por capas que forman la corteza, el manto y un núcleo metálico. El manto está formado por silicatos de magnesio y el núcleo, principalmente, por hierro y aleaciones hierro-níquel, con un núcleo externo fluido y uno interno sólido con alta rigidez. La capa externa de la corteza, a su vez, se caracteriza por oxígeno, silicio, aluminio y hierro, que constituyen 88% de su masa; si a ellos se añade calcio, sodio, potasio y magnesio, se tiene más de 99%. Los minerales formadores de las rocas en la corteza más comunes son unos 22 minerales; lo que contrasta con la diversidad de los minerales documentados en la corteza.

Los estudios de la concentración, distribución y propiedades de los otros elementos y minerales presentes en bajas proporciones son; sin embargo, críticos para entender la constitución y evolución del planeta y del sistema solar. En

particular, las investigaciones sobre los elementos refractarios, litófilos, siderófilos, isótopos estables e isótopos radioactivos aportan la información para modelar la evolución del sistema planetario.

Los estudios acerca de la composición de la Tierra son el componente crítico para entender el origen del sistema solar, con implicaciones y relaciones con las interrogantes respecto de los procesos de diferenciación, formación de núcleos metálicos, estructura interna, fuentes de energía, mecanismos de disipación de calor, geodinámica y tectónica de placas, plumas y convección en el manto, formación y evolución de las cortezas continental y oceánica, origen y evolución del campo geomagnético, origen de la atmósfera y océanos y el origen y evolución de la vida.

## REFERENCIAS

- Allegre, C. J., J.-P. Poirier, E. Humler y A. W. Hofmann, "The chemical composition of the Earth", *Earth Planet. Sci. Lett.*, 134, 1995: 515-526.
- Anders, E. y N. Grevesse, "Abundances of the elements: meteoritic and solar", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 1989: 197-214.
- Anderson, D. L., "Composition of the Earth", *Science*, 243, 1989: 367-370.
- Campbell, I. H. y H. St. C. O'Neill, "Evidence against a chondritic Earth", *Nature*, 483, 2012: 553-558.
- Canup, R. M. y E. Aspaug, "Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation", *Nature*, 412, 2011: 708-712.
- Carpözen, L., *et al.* "Magnetic evidence for a partially differentiated carbonaceous chondrite parent body", *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 108, 2011: 6386-6389.
- Elkins-Tanton, L. T., B. P. Weiss y M. Zuber, "Chondrites as samples of differentiated planetesimals", *Earth Planet. Sci. Lett.*, 305, 2011: 1-10.
- Flores Gutiérrez, D., J. Urrutia Fucugauchi, L. Pérez Cruz y C. Linares, "Micromagnetic and microstructural analyses in chondrules of the Allende meteorite", *Rev. Mex. de Ciencias Geol.*, 27, 2010: 162-174.
- Flores Gutiérrez, D., J. Urrutia Fucugauchi, L. Pérez Cruz, R. Díaz y C. Linares, "Scanning electron microscopy characterization of iron, nickel and sulfur in chondrules from the Allende meteorite - Further evidence for between-chondrules major compositional differences", *Rev. Mex. de Ciencias Geol.*, 27, 2010: 338-346.
- Hirose, K., "Postperovskite phase transition and its geophysical implications", *Rev. Geophys.*, 44, 2006: RG3001.
- Johansen, A., J. S. Oishi, *et al.*, "Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks", *Nature*, 448, 2007: 1022-1025.
- Kargel, J. S. y J. S. Lewis, "The composition and early evolution of Earth", *Icarus*, 105, 1993: 1-25.
- Kleine, T., C. Munker, K. Mezger y H. Palme, "Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf-W chronometry", *Nature*, 418, 2002: 952-955.
- Morard, G., D. Andrault, D. Antonangeli y J. Bouchet, "Properties of iron alloys under the Earth's core conditions", *Comptes Rendus Geosci.*, 346, 2014: 130-139.
- Murakami, M., K. Hirose, K. Kawamura, N. Sata y Y. Ohishi, "Post-perovskite phase transition in MgSiO", *Science*, 304, 2004: 855-858.

- Urrutia Fucugauchi, J. y L. Pérez Cruz, "Multiring-forming large bolide impacts and evolution of planetary surfaces", *Int. Geol. Rev.*, 51, 2009: 1079-1102.
- Urrutia Fucugauchi, J., L. Pérez Cruz y D. Flores Gutiérrez, "Meteorite paleomagnetism - From magnetic domains to planetary fields and core dynamos", *Geofis. Int.*, 53, 2014: 343-363.
- Wanke, H., "Constitution of terrestrial planets", *Phil. Trans. R. Soc. London*, 303, 1981: 287-302.
- Weiss, B. P. y L. T. Elkins-Tanton, "Differentiated planetesimals and the parent bodies of chondrites", *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 41, 2013: 529-560.
- Wesiberg, M. K., T. J. McCoy y A. N. Krot, "Systematics and evaluation of meteorite classification schemes and the early solar system", en D. S. Lauretta y H. Y. McSween (eds.), *Meteorites and the Early Solar System II*, University of Arizona Press, Tucson, 2006, pp. 19-52.
- Wood, B. J., "The formation and differentiation of Earth", *Physics Today*, 64, 2011: 40-45.
- Wood, J. A., "Chondritic meteorites and the solar nebula", *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 16, 1988: 53-72.

## GLOSARIO

**condritas:** meteoritos caracterizados por la abundancia relativa de cóndrulos e inclusiones de calcio y aluminio, dentro de una matriz de silicatos. Estos meteoritos no fueron afectados por fusión y se consideran materiales primitivos formados en las etapas iniciales de evolución del sistema solar. Se caracterizan por fechas radiométricas antiguas, determinadas en los cóndrulos e inclusiones de calcio y aluminio.

**condritas carbonáceas:** meteoritos condriticos que contienen > 0.2 wt % de carbono, caracterizados por compuestos orgánicos y minerales hidratados. Presentan grados de oxidación altos y diferentes grados de alteración metamórfica. Se tienen diferentes clases de condritas carbonáceas con propiedades mineralógicas y químicas distintas. Las condritas carbonáceas presentan abundancias de elementos que reflejan la composición de la nebulosa solar.

**condritas ordinarias:** meteoritos caracterizados por la abundancia de cóndrulos y que constituyen la clase más abundante de meteoritos caídos o recolectados. Se subdividen de acuerdo con los contenidos relativos de elementos metálicos (proporción relativa de hierro).

**cóndrulos:** objetos de composición silíceo de forma esférica o de gota de tamaños submilimétricos encontrados en las condritas. Se forman a partir de polvo rico en sílice que es fundido y enfriado en corto tiempo, durante las fases iniciales de evolución de la nebulosa solar. Esférulas submilimétricas compuestas por distintos minerales, y que suelen constituir entre 20 y 80% de los meteoritos denominados condritas.

**elementos refractarios:** grupo de elementos con altos puntos de ebullición y fusión. No hay una frontera clara entre los materiales refractarios y los que no lo son, pero una de las características habituales en estos materiales es que soportan temperaturas de más de 1100 °C.

**elementos siderófilos:** elementos que tienen tendencia a combinarse con el hierro.

**elementos volátiles:** grupo de elementos y compuestos con bajos puntos de ebullición y fusión.

**meteoritos:** cuerpos de origen externo a la Tierra que ingresan a la atmósfera y alcanzan la superficie. Los meteoritos tienen diferentes orígenes a partir de asteroides, núcleos cometarios o fragmentos de cortezas de otros planetas y satélites eyectados en impactos. Se clasifican en

pétreos, metálicos y pétreo-metálicos, caracterizados por composiciones químicas y mineralógicas diferentes.

**meteoritos diferenciados:** son el resultado de procesos de fusión parcial o total de sus cuerpos de origen. Es decir, estos cuerpos han sufrido diversas transformaciones en sus componentes originales. Proceden de cuerpos planetarios diferenciados y podemos distinguir tres tipos principales: rocosos (o acondritas), metálico-rocosos y metálicos. Sus componentes son frutos de procesos metamórficos ocurridos en cuerpos de miles de kilómetros de diámetro. Aunque puedan mantener formas isotópicas y químicas de los materiales primigenios, sus materiales están formados por minerales secundarios.

**meteoritos no diferenciados:** contienen material que no ha sido objeto de un proceso de fusión.

**planetesimales:** agregaciones formadas en las etapas tempranas de evolución del sistema solar, con tamaños variables en el rango de ~1 a ~100 km. En los modelos de formación de planetas y satélites se considera que estos cuerpos colisionaron, permitiendo la construcción de cuerpos de mayores dimensiones o en otros casos desintegrándose en fragmentos más pequeños.

**xenolitos:** fragmentos de roca y minerales que se encuentran incluidos en rocas ígneas. Xenolitos provenientes de la corteza inferior y manto permiten investigar las composiciones, texturas y propiedades del interior de la Tierra. Xenolitos también pueden estar presentes en meteoritos y en rocas sedimentarias.

## Algunas contribuciones de la química en beneficio de la humanidad\*

ATTILA PAVLATH<sup>1</sup>  
EUSEBIO JUARISTI<sup>2</sup>

El presente capítulo pretende dar a conocer al público en general la relevancia de la química que nos rodea: nos ayuda a vivir sanos y bien alimentados, además permite la comunicación rápida y efectiva entre personas en cualquier lugar del mundo.

Cuando comparamos las condiciones en que vivían los hombres de las cavernas con las de las sociedades actuales, no queda ninguna duda de que existe una enorme diferencia. Y sin embargo, poca gente se da cuenta del papel fundamental que la química ha jugado en esos cambios.

Por supuesto, muchas de las transformaciones involucradas en el proceso de mejorar la calidad de vida humana ocurrieron cuando la gente tenía muy poco conocimiento acerca de la química, y simplemente aplicaron su intuición (y curiosidad) para desarrollar nuevos materiales y sustancias sin entender los fundamentos químicos y sin saber que estaban contribuyendo al desarrollo de la ciencia química. Efectivamente, con poco conocimiento pero con mucha experimentación y mediante estrategias de “prueba y error”, se lograron descubrimientos espectaculares.

Aunque el hombre de las cavernas no comprendía que el fuego es un proceso químico, se dio cuenta que para mantenerlo ardiendo se requería de ponerlo en contacto con materiales combustibles como la madera. Asimismo, los herreros de

\* Basado en la serie de carteles “Technology Milestones in Chemistry” creados por Attila Pavlath con apoyo de la American Chemical Society (ACS) y de la Hungarian Chemical Society (HCS).

<sup>1</sup> Presidente de la ACS desde 2001. Científico principal emérito del Departamento de Agricultura del Western Centro Regional de Investigación (WRRC, por sus siglas en inglés), 800 Buchanan, Albany, California 94710, Estados Unidos.

<sup>2</sup> Miembro de El Colegio Nacional, Luis González Obregón No. 23, Centro Histórico, Deleg. Cuauhtémoc, 06020, México, D. F. y del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), Av. Instituto Politécnico Nacional núm. 2508, Col. San Pedro Zacatenco, C.P. 07360, Del. Gustavo A. Madero, México, D. F.

la Antigüedad descubrieron que al calentar con fuego ciertos minerales se forman materiales sólidos de notable dureza, cuyas propiedades incluso podían mejorarse al mezclarlos con otros metales, “inventando” así las aleaciones metálicas.

Este proceso de “investigación química” del mundo que nos rodea tuvo un impacto perenne en las condiciones en que la humanidad viviría durante miles de años. Los metales, el papel, los materiales textiles, y muchas cosas más se descubrieron sin existir un conocimiento de los fenómenos químicos que están detrás. Debe destacarse también el uso de extractos medicinales de plantas, que permitió a los médicos de la Antigüedad aliviar el dolor y hasta curar a sus contemporáneos.

Una vez que los químicos y químicas pudieron entender las transformaciones de los materiales (es decir, de las moléculas que los constituyen) involucrados en los procesos naturales que ocurren en nuestra vida, la aplicación de la ciencia química ha hecho posible modificar y mejorar dichos procesos y materiales, no por “prueba y error” sino mediante el razonamiento y el aprovechamiento de los principios fundamentales de la química.

La química es esencial en nuestra vida diaria y muy relevante para generar la riqueza y mejorar la economía de cualquier país. Efectivamente, las empresas químicas transforman las materias primas proporcionadas por la naturaleza en productos que utilizamos diariamente. Las fábricas y empresas químicas proporcionan empleo a la población y resultan en crecimiento económico. Además, las innovaciones tecnológicas en el área de la química se traducen en beneficio directo interpretado como una mejoría de la calidad de vida, de nuestra salud y productividad. Es claro que nuestra alimentación, la disponibilidad de agua limpia, nuestra ropa, los medicamentos, las fuentes de energía, el transporte, las computadoras y otros medios de comunicación, y cada faceta de nuestra historia, dependen del desarrollo de la química.

Este capítulo está dividido en cuatro partes, que destacan algunas contribuciones de la química, las cuales son: I. Energía y transporte, II. Información y comunicaciones, III. Medicina y salud y IV. Agricultura y alimentos.

## I. ENERGÍA Y TRANSPORTE

Los químicos y los ingenieros químicos han realizado importantes contribuciones en el ámbito de la energía y el transporte, que nos permiten mover por tierra, aire y en el espacio (figura 1).

Así, durante los últimos dos siglos, los químicos han desarrollado y mejorado diversas fuentes de energía, tales como la proporcionada por las gasolinas, aditivos para combustible, convertidores catalíticos y baterías, tanto desechables como recargables. Recientemente, los avances de la química han hecho posible el desarrollo de motores que utilizan hidrógeno como un combustible “verde”, pues únicamente emite vapor de agua (figura 2).

Figura 1.  
CONTRIBUCIONES DE LA QUÍMICA EN ENERGÍA Y TRANSPORTE.



Figura 2.  
AUTOMÓVIL TOYOTA FCV, IMPULSADO MEDIANTE UNA CELDA DE COMBUSTIÓN  
DE HIDRÓGENO EMITIENDO SÓLO VAPOR DE AGUA.



El primer **reactor nuclear** fue desarrollado para usos militares en 1942. Las aplicaciones de la tecnología nuclear para usos pacíficos, incluyendo la **generación de electricidad** comenzaron en 1951 y la química ha jugado un papel importante produciendo los **materiales radioactivos** utilizados como combustible en los reactores, las barras de control de los reactores que regulan el flujo de neutrones durante el decaimiento radioactivo y el manejo de residuos.

Por medio de la química se han desarrollado: la infraestructura para fuentes alternas de energía, tales como los **paneles solares** para la generación térmica y fotovoltaica, las **hélices livianas de carbono** para la generación de electricidad con el viento, así como **materiales resistentes a la corrosión** para el aprovechamiento de fuentes geotérmicas (figura 3).

Figura 3.  
ENERGÍA NUCLEAR Y OTRAS FUENTES ALTERNAS DE ENERGÍA.



El almacenamiento de la energía eléctrica fue desarrollado por Alessandro Volta a finales del siglo XVIII, y la química ha contribuido desde entonces al uso eficiente de la electricidad con baterías para las **linternas portátiles**. En 1949, una nueva pasta alcalina para la batería tradicional mejoró su tiempo de vida y permitió su miniaturización. Esta batería alcalina rápidamente se utilizó en **aparatos eléctricos portátiles** y **cámaras fotográficas**, en **teléfonos celulares** y en **computadoras portátiles** (figura 4).

Figura 4.  
BATERÍAS EN DIFERENTES PRESENTACIONES Y TAMAÑOS.



Para mejorar la extracción de la gasolina a partir del petróleo crudo, las **refinerías** inicialmente usaban calor para romper las moléculas grandes del aceite viscoso en fracciones más pequeñas utilizando el proceso conocido como **pirólisis**. El uso de **catalizadores** en vez de temperaturas altas para inducir el rompimiento revolucionó el proceso del refinamiento de la gasolina (véase figura 5).

Los motores de los primeros automóviles “detonaban” cuando se utilizaba gasolina de poca calidad. Hoy en día, se agregan a la gasolina pequeñas cantidades

de **aditivos químicos** como alcoholes y éteres para mejorar su octanaje, y reducir la fricción y el deterioro del motor.

Los **convertidores catalíticos** se introdujeron en 1975 para **controlar las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno** de los tubos de escape. La forma en que los convertidores catalíticos funcionan es produciendo una serie de reacciones químicas alrededor del metal, normalmente un **catalizador de platino**. Los óxidos de nitrógeno se convierten en gases de nitrógeno y oxígeno. El monóxido de carbono se convierte en dióxido de carbono y los hidrocarburos sin quemar en agua y dióxido de carbono (figura 5).

Figura 5.  
PRODUCCIÓN DE GASOLINA. ADITIVOS PARA COMBUSTIBLE. CONVERTIDORES CATALÍTICOS.



El automóvil del siglo XXI es muy superior a sus antecesores en diseño, comodidad y seguridad para los pasajeros. La corrosión se ha reducido en forma dramática mediante el uso de **revestimientos** y **materiales** especiales. **Refrigerantes químicos** circulan actualmente en un sistema cerrado. El **vidrio de seguridad** automotriz se introdujo en 1914. Además, hoy en día, **polímeros** especiales cubren el vidrio **protegiendo contra la radiación ultravioleta y el brillo** (figura 6).

El hule natural es impráctico por su suavidad o fragilidad en climas calientes o fríos. Charles Goodyear desarrolló el **proceso de vulcanización** para entrecruzar el polímero con azufre, dando lugar a un hule con mejores propiedades (figura 6).

Figura 6.  
MATERIALES AVANZADOS PARA DISEÑO, SEGURIDAD Y COMODIDAD.



Gracias a los adelantos químicos se ha logrado la **reducción del peso de los automóviles** al sustituir **metales por plásticos** e identificar materiales de alto rendimiento. Los productores de automóviles comenzaron a utilizar **polímeros sintéticos** para muchos componentes rígidos en vista de su dureza, tenacidad y resistencia al clima. En particular, después de la crisis energética de 1970 se buscó reemplazar los metales por materiales livianos para mejorar la eficiencia de los automóviles. Otras aplicaciones se encuentran en **parachoques termoplásticos**, **fibras de polipropileno** que son estables a la luz ultravioleta, **pinturas especiales**, **revestimientos**, y **adhesivos**.

Después de la Edad de Piedra y de la Edad de Bronce, actualmente vivimos en la **Edad del Plástico**, la época que más ha cambiado nuestro estilo de vida. El desarrollo de diversos plásticos ha conducido, por supuesto, a una reducción considerable del peso que presentan diversos aparatos y objetos antes hechos de metal. Finalmente, y también muy importante: los ha hecho más baratos y accesibles para la gente común. En el hogar, los plásticos han sustituido a los materiales tradicionales utilizados en plomería, muebles, ventanas, etc. Además, una gran cantidad de recipientes y utensilios empleados en la cocina, muchos accesorios eléctricos, las fibras sintéticas en la ropa, etc., son polímeros.

En este contexto, las **fibras sintéticas** han reemplazado un gran número de fibras naturales en vista de sus propiedades más favorables. Por ejemplo, el **nylon** constituye un sustituto mucho más económico que la seda, lo que ha revolucionado la industria de la moda. Asimismo, las telas hechas de **poliéster** y **poliacrílicos** presentan ventajas para su lavado y planchado.

Desde 1783, cuando el primer ser humano voló en un globo impulsado con aire caliente, las innovaciones para los globos aerostáticos han sido revolucionarias. El **aire caliente fue reemplazado por hidrógeno**, que es más fácil de manejar. La flamabilidad del hidrógeno siempre presentó un peligro de seguridad, que se resolvió mediante el uso del **helio** (figura 7).

Los vuelos en globos aerostáticos se han convertido en un deporte popular. La química ha contribuido con **materiales de nylon** duraderos, económicos y resistentes al calor, muy útiles en la manufactura de paracaídas y globos aerostáticos (figura 7).

El **lanzamiento al espacio del ser humano es la hazaña más asombrosa de la ingeniería**, que depende de la alta velocidad de propulsión que posee el cohete para superar la fuerza gravitacional de la Tierra. Los cohetes espaciales utilizan **hidrógeno líquido como combustible**.

Conforme el diseño de los aviones fue evolucionando se pasó del empleo de la madera y la tela a materiales de ingeniería sofisticados, **la tecnología química ha provisto los materiales para cumplir con los requerimientos de diseño**. Aleaciones de aluminio y titanio se desarrollaron para proveer dureza, ligereza,

estabilidad a altas temperaturas y resistencia a la corrosión en los aviones. Los cohetes o misiles usan materiales con requisitos especiales por las condiciones de temperatura extrema que manejan. Un ejemplo es el **revestimiento de sílice** que protege la nave cuando vuelve a entrar desde el espacio a la Tierra.

Figura 7.  
GLOBOS AEROSTÁTICOS, COMBUSTIBLES PARA COHETES Y MATERIALES  
DE CONSTRUCCIÓN PARA AVIONES Y COHETES.



## II. INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES

Gracias a diversas innovaciones químicas, de ingeniería química y electrónica, hoy podemos mantenernos en contacto por todo el mundo. El desarrollo de muchas herramientas de comunicación permite **capturar, almacenar y distribuir la información** (véanse figuras 8 y 9). Asimismo, las **comunicaciones inalámbricas** y las **fibras ópticas** proveen los fundamentos de nuestra sociedad del **Internet**.

La química del silicio y los polímeros de alto rendimiento nos han provisto de las **computadoras** y los **microprocesadores** de hoy en día. **Las películas, la televisión y la fotografía**, todos dependen de la química.

El **teléfono** se ha convertido en la piedra angular de la vida moderna proveyendo conexión instantánea alrededor del mundo. El servicio de teléfono transoceánico se manejaba con cables submarinos en 1956, y desde 1962 fue por satélites de comunicación. Los ingenieros químicos han desarrollado desde **cables de cobre** hasta **fibras ópticas**.

Figura 8.  
INFORMACIÓN Y LOS MEDIOS DE COMUNICACIÓN.



Figura 9.  
EL DISCO COMPACTO (CD, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS).



Los **teléfonos celulares** dependen de circuitos integrados, materiales avanzados y técnicas para la fabricación a escala en miniatura.

En 1949, se introdujo la **fotocopiadora** que permitió obtener réplicas exactas de la imagen original. Las innovaciones químicas de la tecnología del **fax** incluyen **tintas y otras sustancias químicas para cambios de color** (los tóneres).

Las fibras de vidrio puro que hacen posible transportar la **información vía luz producida por láser**, es un logro técnico revolucionario. Investigadores químicos inventaron la primera fibra óptica en 1970. Hoy en día, **un solo cable de fibra óptica puede transmitir millones de llamadas telefónicas, archivos de datos e imágenes de video** (figura 10).

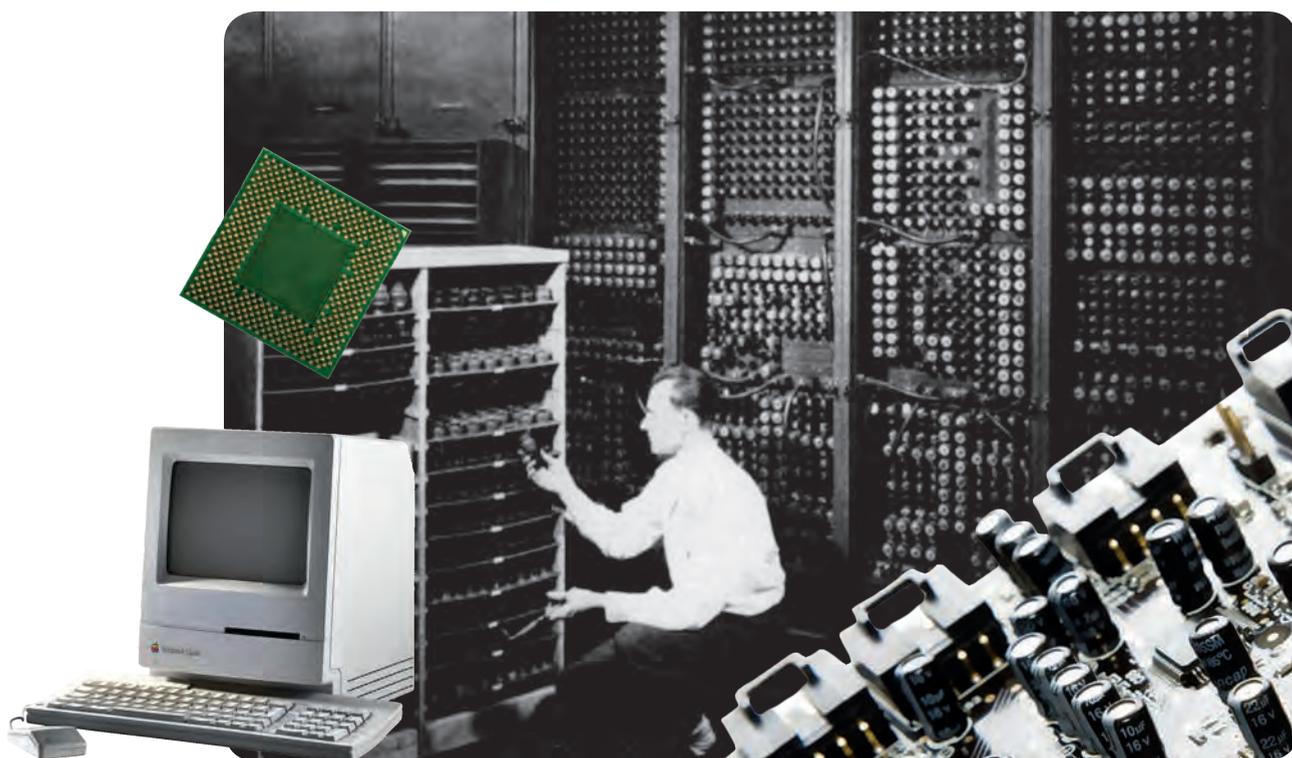
Figura 10.  
EL DESARROLLO DEL TELÉFONO Y LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS.  
TECNOLOGÍA DEL FAX Y LA FOTOCOPIADORA. LÁSER Y FIBRAS ÓPTICAS.



La ingeniería química ha jugado un papel central en la revolución introducida por la computación y continúa generando **computadoras cada vez más ligeras, más poderosas y más económicas**. En 1946, la Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC), la primera computadora electrónica digital, comenzó a operar y la primera microcomputadora debutó en 1962. Hoy la innovación electrónica continúa con **transistores, circuitos integrados de silicio y aparatos de almacenamiento de datos**.

La computadora ENIAC construida en 1946 utilizaba diecisiete mil cuatrocientos sesenta y ocho bulbos y consumía 150 kW de poder. El invento del **transistor** permitió sustituir los bulbos, dando lugar a la producción de computadoras con un tamaño práctico, utilizados en cualquier hogar hoy en día (figura 11).

Figura 11.  
EVOLUCIÓN DE LAS COMPUTADORAS. TECNOLOGÍA DE LOS SEMICONDUCTORES.  
*SILICON CHIPS Y CIRCUITOS INTEGRADOS.*



La química hace posible transformar los elementos silicio y germanio en **semiconductores** para dirigir la corriente en las computadoras. **Los semiconductores facilitan el que los componentes electrónicos sean más pequeños, rápidos y eficientes desde el punto de vista energético.**

Los circuitos integrados de silicio consisten en transistores, resistores, capacitores y circuitos de memoria construidos sobre capas de silicio que luego se

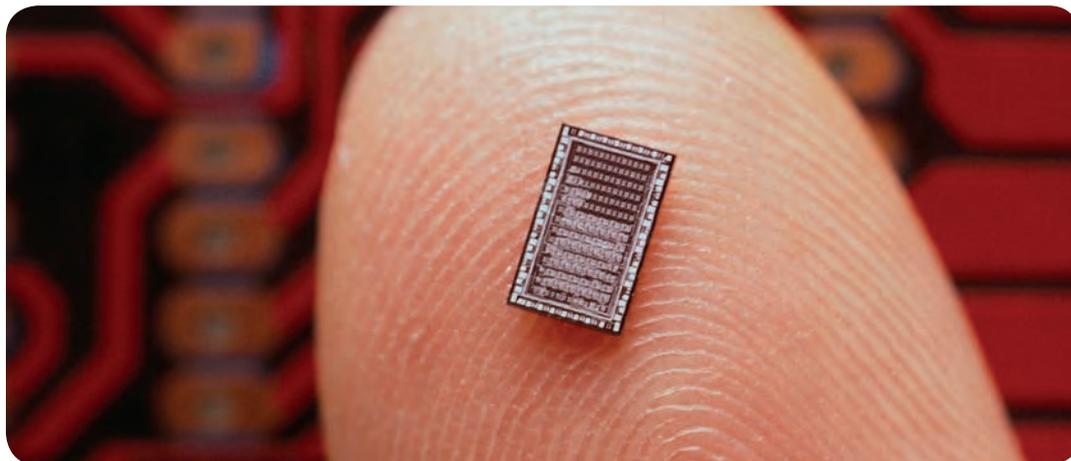
exponen a un proceso químico. En 1967 se construyó la primera calculadora portátil utilizando circuitos integrados, y en 1980 se aplicaron a las computadoras (figura 12).

Figura 12.  
APARATOS ELECTRÓNICOS DOMÉSTICOS. PLÁSTICOS AVANZADOS Y TRANSISTORES.



Los **aparatos microelectrónicos** son el corazón de un sinnúmero de aparatos modernos, tales como el **reproductor de discos compactos**, el **televisor**, las **computadoras**, la **cámara digital** y los **aparatos inalámbricos**. Los procesos desarrollados para producir semiconductores han resultado en la disponibilidad de componentes, tales como los transistores y los circuitos integrados, que pueden ser ensamblados en **circuitos electrónicos complejos** para proveer nuevas funciones a un amplio rango de aparatos electrónicos (véase figura 13).

Figura 13.  
LOS CIRCUITOS INTEGRADOS SE EMPLEAN EN MUCHOS ACCESORIOS DE NUESTRA VIDA DIARIA. BUSCANDO SU MAYOR EFICIENCIA, LOS CIRCUITOS INTEGRADOS SON CADA VEZ MÁS PEQUEÑOS Y PODEROSOS.



Los aparatos electrónicos domésticos, los teléfonos celulares y la computadora personal dependen de la disponibilidad de **plásticos duraderos, fuertes y aislantes** para proteger los componentes eléctricos sensibles. Los plásticos son esenciales para la aplicación electrónica por sus propiedades aislantes; ya que el flujo de electrones que conduce la corriente no puede penetrar la estructura molecular del plástico (figura 14).

Figura 14.  
LOS CIRCUITOS INTEGRADOS REEMPLAZARON A LOS TRANSISTORES, CONDUCIENDO A APARATOS ELECTRÓNICOS CADA VEZ MÁS PEQUEÑOS, LIGEROS Y POTENTES.



En 1947 se inventó el transistor, que reemplazó gradualmente los voluminosos tubos de vacío, y luego los circuitos integrados (que contienen millones de transistores) sirvieron de base para el desarrollo de la electrónica moderna, la computadora y las comunicaciones.

### III. MEDICINA Y SALUD

A principios del siglo xx, la **edad promedio de vida** en México no rebasaba los 45 años. En contraste, a principios del siglo xxi el promedio de vida se acerca a los 80 años. Este notable avance se debe en gran medida al desarrollo de nuevos y más potentes **fármacos** que han acabado con las enfermedades letales que aquejaban a la población mexicana (figura 15).

Figura 15.

GRACIAS A LA QUÍMICA MEDICINAL VIVIMOS MÁS TIEMPO Y DE MANERA MÁS SALUDABLE.



Utilizada desde principios de 1800 para **disminuir la sensación de dolor**, la morfina se extraía del opio crudo. En 1923 se estudió su **estructura química** para, posteriormente, **sintetizar otros analgésicos, libres del efecto indeseable de la adicción**.

En 1897, la compañía Bayer sintetizó el ácido acetilsalicílico (**aspirina**), el primer medicamento producido a nivel industrial que todavía se produce en grandes cantidades hoy en día. La aspirina se utilizó principalmente para el alivio del **dolor de cabeza** hasta mediados de los ochenta, cuando se descubrieron sus efectos benéficos contra los ataques al corazón.

A partir de 1940, en estudios realizados en la corteza de la glándula adrenal se detectó la presencia de unas hormonas naturales llamadas **esteroides**, las cuales demostraron poseer **propiedades antiinflamatorias**. La cortisona, un esteroide natural, se produce en escala industrial, por su **efecto positivo sobre la artritis reumatoide**. Además, se utiliza en pacientes con asma (figura 16).

Figura 16.  
LA MORFINA, LA ASPIRINA Y LA CORTISONA.



La **clorpromazina** fue usada por primera vez en 1954 para tratar la **esquizofrenia**. Esta nueva terapia resultó ser sumamente **efectiva con lo que comenzó la era moderna de la terapia antipsicótica**. El control de las **enfermedades mentales** con medicamentos pronto sustituyó métodos anteriores, como las descargas eléctricas o la lobotomía y colaboró en la disminución del internamiento de individuos con problemas mentales. Investigaciones posteriores revelaron los mecanismos de acción farmacológica de la clorpromazina y sirvieron de base para el desarrollo de otros medicamentos antipsicóticos (figura 17).

En 1958 un estudio clínico con **imipramina**, un fármaco inicialmente que fue desarrollado como antipsicótico, reveló sus propiedades **antidepresivas**. Esta droga funciona disminuyendo la actividad de los neurotransmisores en el cerebro, que es un tratamiento estándar para estas enfermedades.

En 1959, el descubrimiento del librium dio inicio al desarrollo de una nueva clase de **agentes tranquilizantes**, las benzodiazepinas que resultaron ser muy efectivas en el tratamiento de la epilepsia.

Figura 17.  
AGENTES PSICOTERAPÉUTICOS Y ANTIDEPRESIVOS.



La insulina, una **hormona proteica** producida por el páncreas, **controla el nivel de azúcar en la sangre**. La falta de insulina provoca el desarrollo de la **diabetes de tipo 1**, una enfermedad considerada letal en los años veinte. La primera **insulina** desarrollada de fuentes humanas, usando técnicas de ácido desoxirribonucleico recombinante (ADNr), fue producida en 1982.

La **testosterona** es responsable del **desarrollo de los órganos sexuales masculinos** y de las características sexuales secundarias. Es una hormona esteroidea, estructuralmente parecida al colesterol. La testosterona se puede manufacturar por medio de modificaciones químicas y microbiológicas de sustancias disponibles en la naturaleza.

En los años treinta, dos **hormonas** femeninas fueron aisladas de fuentes naturales; de la orina de yeguas preñadas y la raíz de un tubérculo mexicano (“Cabeza de negro”). Sus excelentes **cualidades anticonceptivas** condujeron al desarrollo de los anticonceptivos orales (**la píldora para el control de la natalidad**) para las mujeres (véanse figuras 18 y 19).

Figura 18.  
HORMONAS Y REGULADORES HORMONALES. PROGESTINAS, ESTRÓGENOS  
Y ANTICONCEPTIVOS ORALES.



Figura 19.

PRUEBA DE EMBARAZO EN MUESTRAS DE ORINA, PUEDE REALIZARSE EN LA PRIVACIDAD DEL HOGAR.

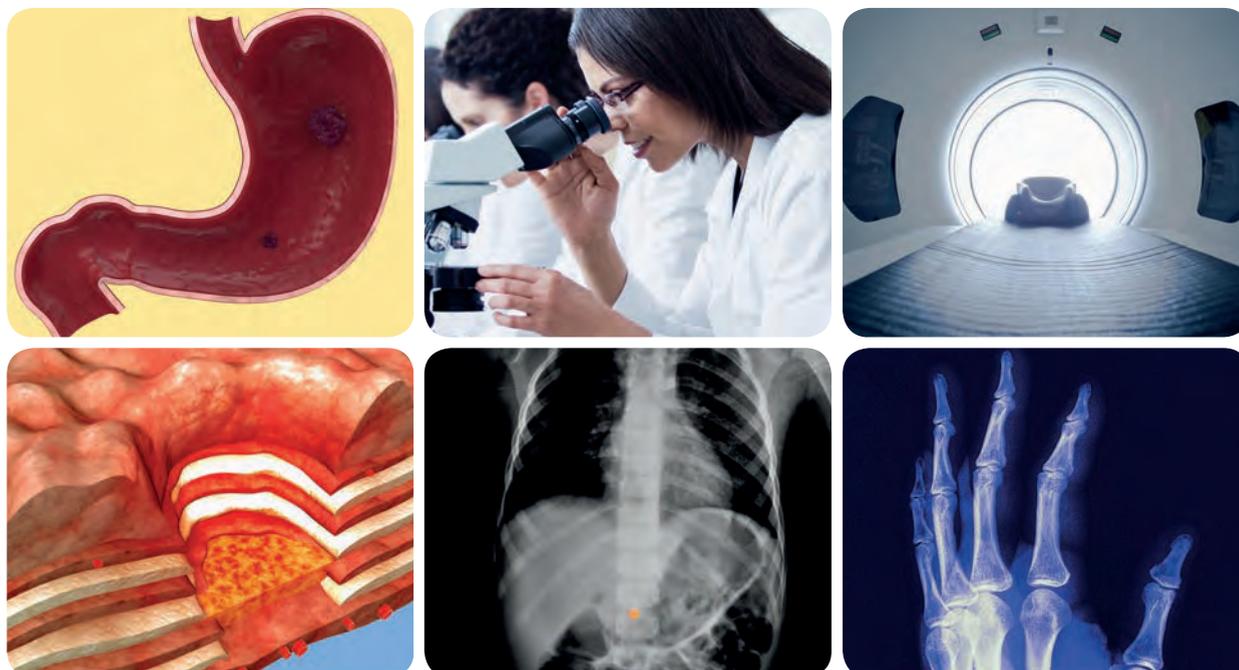


Las úlceras gástricas se deben a la producción excesiva de ácido en el estómago. En 1976, se desarrolló el medicamento **cimetidina** que inhibe la producción de ácidos gástricos, disminuyendo dramáticamente la necesidad de cirugía.

Equipos médicos, tales como las **máquinas de rayos X** y los equipos para **imágenes por resonancia magnética** ya son parte de los equipos rutinarios en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Para 1900, cada hospital contaba con una máquina de rayos X. La tecnología de la resonancia magnética nuclear (RMN) fue utilizada originalmente en los años setenta para determinar estructuras químicas. Se aprobó su uso en seres humanos en 1985 (figura 20).

Figura 20.

AGENTES GASTROINTESTINALES Y TERAPIA DE ÚLCERAS.



En 1935 Hevesy utilizó **núclidos radioactivos** para determinar mecanismos metabólicos. **Los compuestos son marcados con isótopos radioactivos**, tales como el tecnecio-99 y el talio-201 que permiten monitorear su distribución por el cuerpo para proveer **imágenes de los órganos donde son transportados**. La aplicación diagnóstica de isótopos en la medicina incluye la **detección de tumores** y el diagnóstico de enfermedades del hígado (figura 21).

Figura 21.  
TECNOLOGÍAS DE IMAGENOLÓGÍA MÉDICA. ISÓTOPOS EN LA MEDICINA.



Por sus propiedades antibacteriales el **salvarsan** resultó muy efectivo contra la **sífilis**, enfermedad letal de transmisión sexual.

En 1943, durante la Segunda Guerra Mundial, el descubrimiento de la **penicilina redujo dramáticamente las infecciones y las amputaciones** en soldados heridos. En este tiempo la penicilina era tan costosa que se reciclaba de la orina de los pacientes tratados con el medicamento. En los años cuarenta se **determinó la estructura** de la penicilina, permitiendo así su síntesis. De ahí el comienzo de la **era moderna de la terapia con antibióticos**.

La zidovudina (AZT) se utilizó con éxito para el tratamiento del **Virus de Inmunodeficiencia Humana (VIH)** en 1987. Este medicamento se sintetizó por primera vez en 1964 para el tratamiento de cáncer pero probó ser inefectivo. No fue hasta 1986, que un grupo de científicos descubrieron sus propiedades antivirales (figura 22).

Figura 22.  
MEDICAMENTOS ANTIINFECCIOSOS Y ANTIVIRALES.



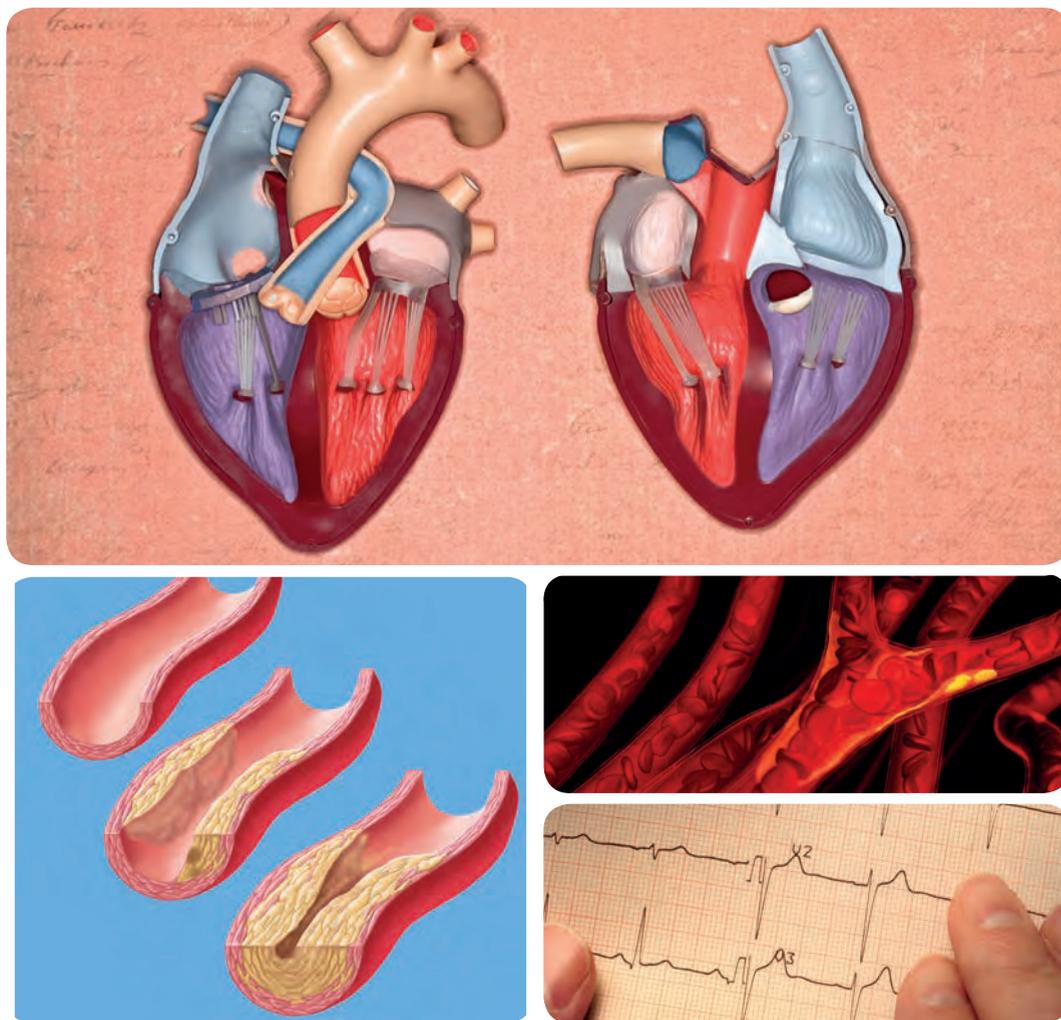
La posibilidad de regular los latidos del corazón utilizando **procaína**, fue descubierta en los años treinta. La procaína **inhibe la membrana celular proteica conocida como los canales de sodio**.

Un grupo de compuestos naturales encontrados en las plantas, los **glicósidos esteroidales** han sido utilizados para el tratamiento de fallas cardiacas. Investigaciones han mostrado que **aumentan la fuerza con que se contrae el corazón**. La **digoxina** fue extraída de las hojas de la *Digitalis lanata* y aprobada en 1954 para el tratamiento del paro cardiaco.

La **heparina**, un producto natural aislado del hígado de animales, fue utilizada por primera vez **para prevenir la trombosis (coagulación de la sangre)** durante una transfusión de sangre. También previene la formación de coágulos sanguíneos durante cirugías cardiacas y arteriales.

La acumulación de depósitos de colesterol en las arterias (la **arteriosclerosis**) es el causante principal de varias enfermedades, así como **paros cardiacos**. El **lovastatin (mevacor)**, cuya función es controlar los niveles de colesterol al inhibir una enzima crítica que convierte mevalonato, una etapa temprana de la biosíntesis del colesterol, fue aprobada en 1987. Otros medicamentos efectivos, como la **atorvastatina**, han revolucionado el **tratamiento de los altos niveles de lípidos en la sangre** (véase figura 23).

Figura 23.  
REGULACIÓN DE LOS LATIDOS DEL CORAZÓN Y EL TRATAMIENTO DE FALLAS CARDIACAS.  
CONTROL DE LOS NIVELES DE COLESTEROL.



El uso de sustancias químicas para el tratamiento del cáncer (la quimioterapia) comenzó en 1942 con el uso clínico de medicamentos bloqueadores de ácido fólico. La **aminopterin**, en 1947 probó ser efectiva contra la **leucemia**, pero su efecto adverso sobre las células blancas condujo a su sustitución por el **metotrexato**.

Los medicamentos **citotóxicos** (o medicamentos que son **venenosos para las células**) fueron aislados de plantas y utilizados por primera vez en la quimioterapia en 1963. Estos medicamentos anticancerígenos trabajan con el **principio de que las células cancerígenas se reproducen más rápido y son más susceptibles a los medicamentos citotóxicos**. El **taxol** se aisló de la corteza del árbol *Pacific Yew* (“Tejo del Pacífico”) en 1971 y se desarrolló para el tratamiento del **cáncer** avanzado de seno y de pulmón a principios de los años noventa (figura 24).

Figura 24.

LA EVOLUCIÓN DE LA QUIMIOTERAPIA Y LOS MEDICAMENTOS CITOTÓXICOS.



Las prótesis y los órganos artificiales, lentes de contacto y otros materiales médicos fuertes, flexibles y duraderos son creados con plásticos especiales, gracias a la química. Algunos de estos artefactos incluyen el riñón artificial desarrollado en 1945, las válvulas protésicas del corazón de los años cincuenta y el corazón artificial en 1982 (véase figura 25).

Huesos y diversos órganos humanos pueden ser trasplantados de una persona a otra, aunque un problema es que muchas veces el sistema inmune del paciente que recibe el trasplante tiende a rechazar dicho órgano. Sin embargo, investigación química en el área de ciencia de materiales ha hecho posible el desarrollo de materiales especiales que además de ser compatibles, pueden ser manufacturados con la forma exacta del órgano que está siendo sustituido (véase figura 26).

Figura 25.  
NOVEDOSOS MATERIALES PARA LA SALUD. PRÓTESIS ARTIFICIALES Y OTROS  
EQUIPOS MÉDICOS. DESINFECTANTES Y BLANQUEADORES.

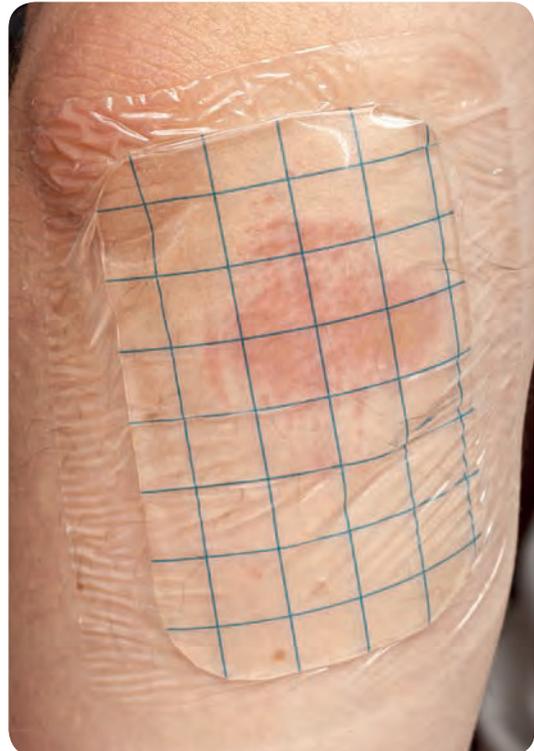
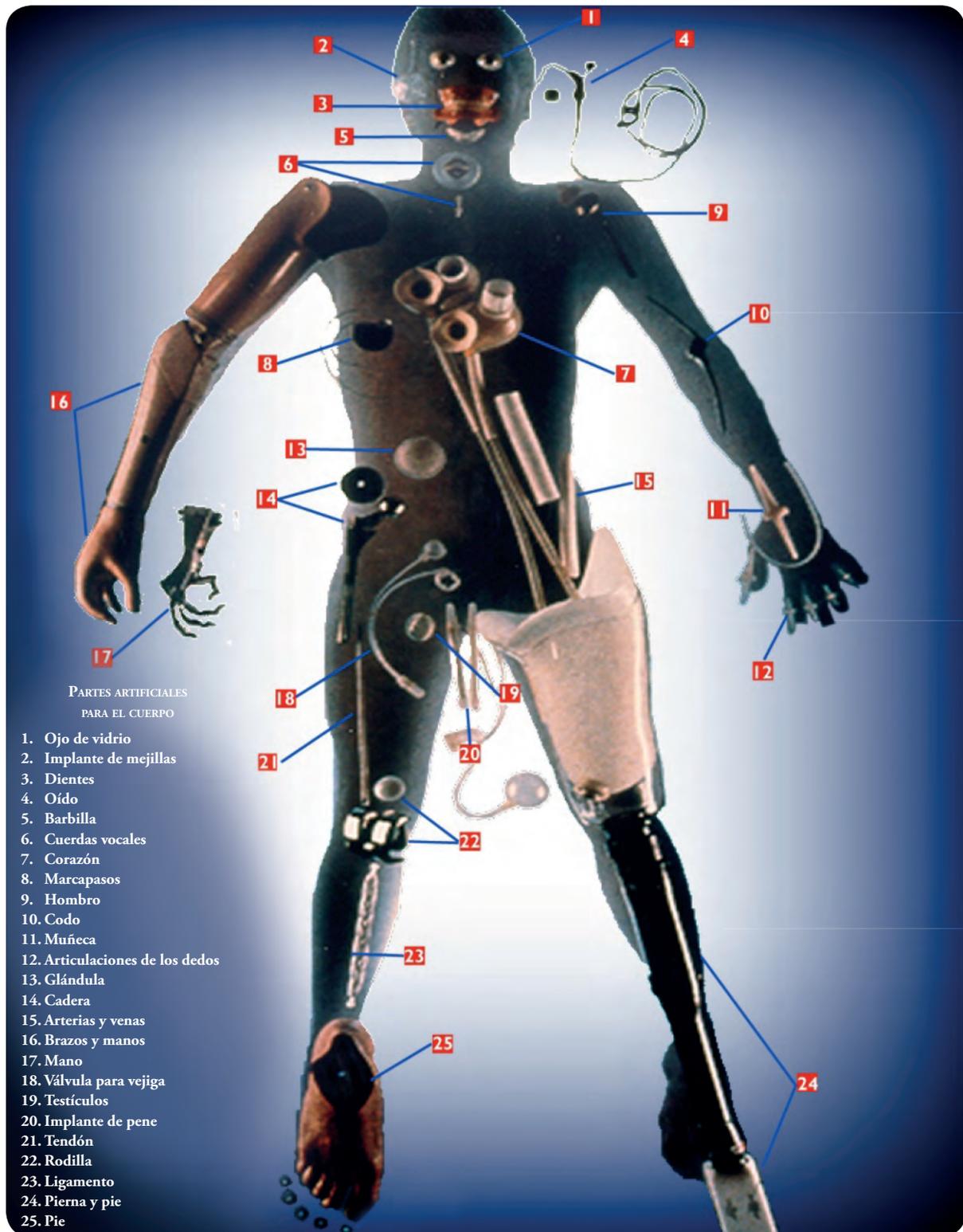


Figura 26.  
 ÓRGANOS, TEJIDOS Y HUESOS QUE ACTUALMENTE PUEDEN SER SUSTITUIDOS  
 POR SUS EQUIVALENTES ARTIFICIALES.



El equipo médico de hoy en día debe ser lo suficientemente duradero y a la vez propenso a su **esterilización**. Muchos procesos médicos rutinarios utilizan equipos, tales como los estetoscopios, vendajes y otros materiales **textiles novedosos**, **jeringuillas**, **instrumentos quirúrgicos**, bolsas de sangre y materiales plásticos que son producidos a través de la química.

La química facilita la **limpieza del hogar**, mediante la **destrucción del moho y los hongos**, además de la **remoción de manchas**. A principios de 1900, los químicos se enfocaron en el **control de las bacterias** y la **limpieza efectiva de la ropa**.

#### IV. AGRICULTURA Y ALIMENTOS

Los químicos y los ingenieros químicos han realizado varias contribuciones a la agricultura y la producción de **alimentos**, que han permitido su consumo en abundancia y con alto **valor nutritivo**.

Los agricultores modernos están utilizando los nuevos avances tecnológicos para alcanzar una mejor producción agrícola al aplicar **fertilizantes y pesticidas**. Los consumidores se han beneficiado de las nuevas tecnologías que han mejorado el sabor, la apariencia, la disponibilidad y el valor nutritivo de los alimentos (figura 27).

Figura 27.  
AGRICULTURA Y ALIMENTOS.



La fijación de nitrógeno es un proceso esencial donde los microorganismos convierten el nitrógeno, que es poco reactivo, en compuestos de nitrógeno, que a su vez entran a la cadena alimentaria como compuestos de nitrógeno orgánico, tales como las proteínas. La mayoría de los suelos disponibles para cultivos son deficientes en nitratos. Por esta razón, muchos procesos comerciales se han desarrollado para producir productos químicos nitrogenados o fertilizantes; como el muy conocido **proceso de Haber-Bosch**.

A finales del siglo XIX, la escasez de alimentos y el aumento en la población hizo temblar al mundo. El contenido de nitrógeno en el suelo agrícola había sido agotado. Algunos científicos hicieron predicciones de una hambruna mundial si esto continuaba. Surgió entonces una necesidad urgente para la **producción de compuestos nitrogenados a partir del aire**; en particular la síntesis de amoníaco, utilizando un catalizador de hierro a altas presiones y temperaturas. Este proceso industrial promovió el aumento en la producción agrícola y permitió el crecimiento poblacional durante el siglo XX (figura 28).

Figura 28.  
NUTRIENTES DE SUELO Y FERTILIZANTES. EL PROCESO DE HABER-BOSCH.



Los edulcorantes artificiales fueron creados para ayudar a los pacientes diabéticos en el control del consumo de azúcar. En 1901, John F. Queeny sintetizó el edulcorante artificial **sacarina**. El **aspartame** se vendió por primera vez en Estados Unidos en 1985; éste es un edulcorante de bajas calorías.

La química ha propiciado la **cura de enfermedades causadas por la deficiencia de vitaminas** en la dieta alimenticia; por ejemplo, gracias al descubrimiento de la **vitamina A**, que es el nutriente esencial **para la visión** (figura 29).

Figura 29.  
LA SACARINA Y OTROS EDULCORANTES. ADITIVOS VITAMÍNICOS.



La tecnología para el cuidado y almacenamiento de alimentos utilizando **plásticos, metales, vidrio y cerámica**, contribuye a la preservación del alimento durante su preparación, venta y distribución. El **polímero saran**, se introdujo en el hogar como la **envoltura de saran**, un producto **excelente para proteger los alimentos del oxígeno, la humedad y los olores**. El saran es un copolímero de cloruro de vinilideno y cloruro de vinilo. Otras innovaciones incluyen la utilización de **latas de aluminio para almacenar comestibles y bebidas** y el **tereftalato de polietileno (PET, por sus siglas en inglés)**, utilizado como envase reciclable **para sustituir el vidrio o el aluminio**.

Un aparato eléctrico promovido por los avances de la química es el **horno de microondas**. En 1945, Percy L. Spencer estaba trabajando con un radar de transmisión en los laboratorios de Raytheon, cuando se dio cuenta que un dulce que se encontraba en su bolsillo estaba derretido. Fascinado por este acontecimiento, replicó la experiencia con palomitas de maíz, de ahí nace la tecnología del horno de microondas, que reduce significativamente el tiempo requerido para la cocción de alimentos.

Los avances de la química han asegurado que las fuentes de agua sean seguras, libres de bacterias, virus y otros contaminantes. Las técnicas usadas para lograr esto incluyen el uso de **carbón activado para remover el mal olor y sabor**, y **otras sustancias para remover metales pesados** (véanse figuras 30 y 31).

Figura 30.  
ALMACENAMIENTO DE ALIMENTOS. EL HORNO DE MICROONDAS. AGUA POTABLE.



Figura 31.  
PAPEL ALUMINIO PARA PROTEGER LOS ALIMENTOS.



#### COMENTARIO FINAL

En resumen, no hay duda de que la química ha contribuido con innumerables beneficios en todos los aspectos de nuestra vida. ¡Sin esas contribuciones estaríamos de regreso en la Edad de Piedra!

## La química y la medicina: dos episodios en su historia

RUY PÉREZ TAMAYO

### INTRODUCCIÓN: LA MEDICINA ANTES DE LA QUÍMICA

La medicina primitiva era (y sigue siendo) esencialmente mágico-religiosa. De acuerdo con esta idea, las enfermedades son fenómenos sobrenaturales que obedecen a causas divinas. Habitualmente se consideran condenas o castigos enviados al paciente como consecuencias de la violación de algún tipo de mandato o tabú, y su manejo requiere prácticas mágicas y sobrenaturales como rezos, danzas, sacrificios, hecatombes y otras ceremonias más, frecuentemente oficiadas por sacerdotes o chamanes. También se usan diferentes preparaciones, derivadas de plantas o de animales, en forma de brebajes o ungüentos dotados también de supuestos poderes curativos.

En la Antigüedad, y por un breve lapso de unos 700 años (del siglo v a.C. al II d.C.), en Grecia primero y en el mundo helénico después, surgió una práctica médica basada en un concepto distinto de enfermedad. En la época presocrática, un grupo de filósofos y pensadores comenzaron a descartar las explicaciones sobrenaturales, mitológicas y divinas para distintos fenómenos de la naturaleza, como los movimientos de los cuerpos celestes, los eclipses, la sucesión del día y de la noche, las tormentas eléctricas y las olas del mar. Los filósofos pretendían comprender la realidad sin salirse de ella. Así surgió la idea de que las enfermedades no tenían nada que ver con los dioses sino que eran otros fenómenos naturales más, consecuencias de cambios orgánicos internos o de modificaciones en la dieta o en el medio ambiente. Esta nueva forma de pensamiento, que yo considero como el descubrimiento más importante en toda la historia de la medicina, marcó la emergencia de la escuela hipocrática de la práctica médica (véase figura 1), basada en gran parte en ella, y que culminó cinco siglos más tarde con la obra de Galeno (véase figura 2). La idea de la enfermedad como un fenómeno natural se plasmó en la teoría de los

Figura 1.  
HIPÓCRATES DE COS (CA. 460-CA. 370 A.C.).



Figura 2.  
GALENO DE PÉRGAMO (CA. 129 A.C.-216 D.C.).



humores, que dominó el pensamiento médico durante el milenio siguiente. Según esta teoría, el organismo contiene cuatro líquidos o humores, que son la sangre, la flema, la bilis amarilla y la bilis negra. La salud se caracteriza por el equilibrio entre estos cuatro humores, mientras que la enfermedad es la manifestación de la pérdida de tal equilibrio, por aumento o disminución de la cantidad normal de alguno de ellos. No se trató de la desaparición completa de la participación de los dioses en la enfermedad; éstos siguieron teniendo vigencia, aun entre los médicos hipocráticos. Las deidades podían actuar muy bien a través de fenómenos naturales para causar enfermedades. Esculapio, hijo de Apolo (véase figura 3), era considerado como el principal dios médico, que había aprendido el arte de curar con Quirón, el centauro; los templos de Esculapio se encontraban en toda Grecia y los ciudadanos de la *polis*, y después del mundo helénico, acudían regularmente a ellos para solicitar al dios el alivio de sus males.

Pero en el siglo II de nuestra era se inició el colapso del Imperio Romano y surgió en Occidente la Iglesia católica, apostólica y romana como la autoridad hegemónica tanto en asuntos seculares como religiosos. Con ella se reafirmó la idea de la enfermedad como castigo divino pero se conservó la teoría humoral galénica, lo que sirvió para introducir la distinción entre las causas de las enfermedades (su etiología) y los procesos que las explican (su patogenia). Durante los 14 siglos siguientes las causas de las enfermedades siguieron siendo sobrenaturales, mientras que sus mecanismos eran distintos trastornos del equilibrio de los humores del organismo.

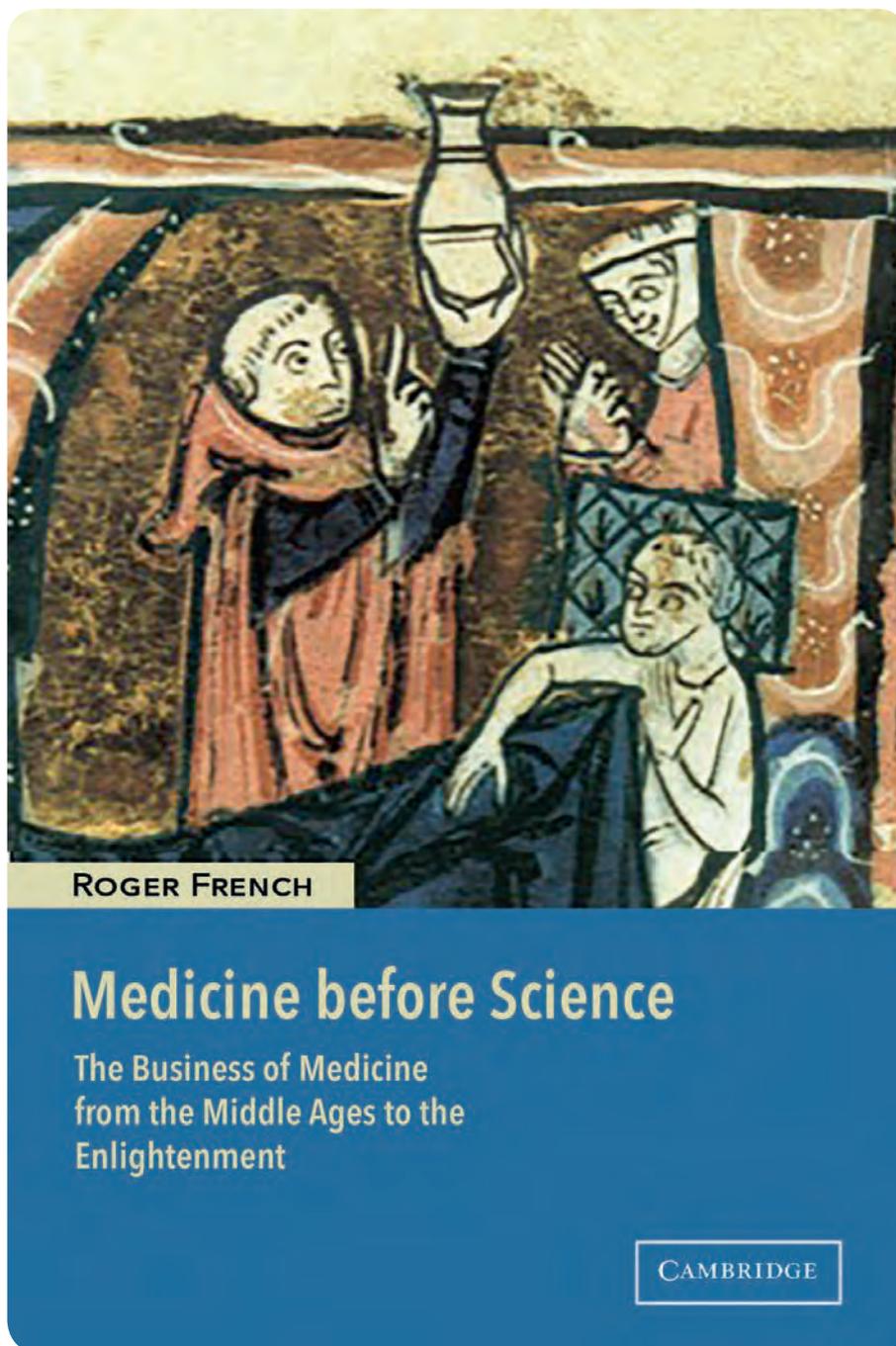
¿Cómo era la medicina a fines de la Edad Media y principios del Renacimiento, o sea en los siglos XII a XVI de nuestra era? Quizá su mejor descripción se logre a través de caracterizar al personaje bautizado por French (véase figura 4) como el *Doctor Ilustrado y Racional*, quien además compartía una *Buena Historia* con sus pacientes. Este médico, aceptado como el más sabio y competente por la sociedad, había estudiado en algunas de las universidades reconocidas (Salerno, Montpellier, Bolonia, Padua, París, Oxford, entre otras); había cursado primero las artes (el *Trivium*, lógica, gramática y retórica, y el *Quadrivium*, astronomía, aritmética, geometría y música) durante unos tres o cuatro años, para después incorporarse al estudio teórico de la filosofía natural y de la medicina por otros cuatro años. Su educación se basaba en la escolástica, cuyo elemento central era la *disputatio*, la discusión teórica de preguntas generales surgidas de la lectura de textos clásicos, galénicos o aristotélicos, como: “¿Necesita el médico las ciencias teóricas?”, o bien, “¿Necesita el médico la lógica?”, y también, “¿Es la medicina una ciencia?”.

El objetivo de esta enseñanza era mantener al médico alejado del empirismo, o sea del aprendizaje de la medicina a partir de su práctica. Esto resultó en la presencia de, por lo menos, tres tipos de profesionales de la medicina en la Edad Media: 1) los *metodistas*, dedicados a temas teóricos generales; 2) los *empíricos*, que

Figura 3.  
ESCULAPIO, HIJO DE APOLO.



Figura 4.  
EL LIBRO DE ROGER FRENCH, SOBRE LA MEDICINA MEDIEVAL.



trabajaban en problemas prácticos de la profesión, alejados de toda teoría y 3) los *racionales* (también identificados por el nombre menos favorable de *dogmáticos*), que construían sus conocimientos médicos en forma equilibrada, con aportes tanto teóricos como prácticos.

A lo largo de la historia, y hasta principios del Renacimiento, la teoría humoral de la enfermedad conservó una estructura lógica: cuando uno de los humores reducía su concentración, los síntomas manifestados por el enfermo correspondían a la ausencia de algo: sensación de vacío, debilidad, mareo, pérdida de peso. En cambio, el exceso o acumulación de cualquiera de los humores provocaba dolor, fiebre y congestión. Posteriormente se agregó otro elemento, un “calor interno” localizado en el corazón, necesario para derivar los cuatro humores de los alimentos, mantenerlos en movimiento, mezclarlos y lograr un equilibrio adecuado entre ellos. En la consulta médica, una vez establecido el diagnóstico de la enfermedad, el *Doctor Ilustrado y Racional* procedía con el tratamiento, que se limitaba a tres medidas generales: sangrado, dieta y diferentes fármacos, ungüentos o pócimas, preparados con diversos vegetales, minerales y hasta animales, con efectos farmacológicos reales o imaginarios. El término *farmacia galénica* ha persistido desde la Antigüedad, aunque con diferente contenido; el tratado más famoso sobre materia médica era el de Dioscórides (siglo I a.C.), quien sólo incluyó 850 plantas, animales y minerales, mientras que el de Ibn al-Baytar (*ca.* 1248), basado en más de 250 publicaciones, incluyendo las de Dioscórides, Galeno, Rhazes, Avicena y muchos otros más, contenía más de tres mil entradas. La preparación conocida como la *teriaca*, inicialmente usada como antídoto contra la picadura de serpientes, tenía al principio 41 ingredientes, después aumentó a 48, luego a 64, y en la formulación de Galeno ya contaba con 77 componentes, de los que los dos más importantes eran el cuerpo macerado de alguna serpiente y el opio.

Todo lo anterior apoya la conclusión de que hasta los principios del Renacimiento, o sea hasta los siglos XII a XVI, en el mundo occidental la química tuvo muy poca relación con la medicina. En cambio, la astrología y la alquimia eran convocadas con frecuencia, no sólo en el ambiente médico sino en muchos otros aspectos de la vida de la sociedad. Los primeros asomos del interés de la química en la medicina datan del siglo XV y se asocian con el personaje conocido como Paracelso.

## EPISODIO 1: LA VISIÓN DE PARACELSO

*Phillippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim, Eremita, llamado Paracelso, Doctor de Ambas Medicinas y Profesor de Teología, Adepto de la Sagrada Cábala y Experto del Arte Alquímico, Amigo del Hombre Común y Defensor de la*

*Libertad*, quien nació en 1493 y murió en 1541 puede presentarse como el primer responsable de la introducción de la química en la medicina (véase figura 5). De este personaje se han dicho muchas cosas, de las que sólo citaré las siguientes dos:

Lo que engrandece a este hombre como pensador y como médico es el anti-intelectualismo de su actitud, el valor con el que destruyó las imágenes de los antiguos, especialmente de Galeno [...] fue un mártir de la ciencia, porque rechazó la especulación en aras de la experiencia.

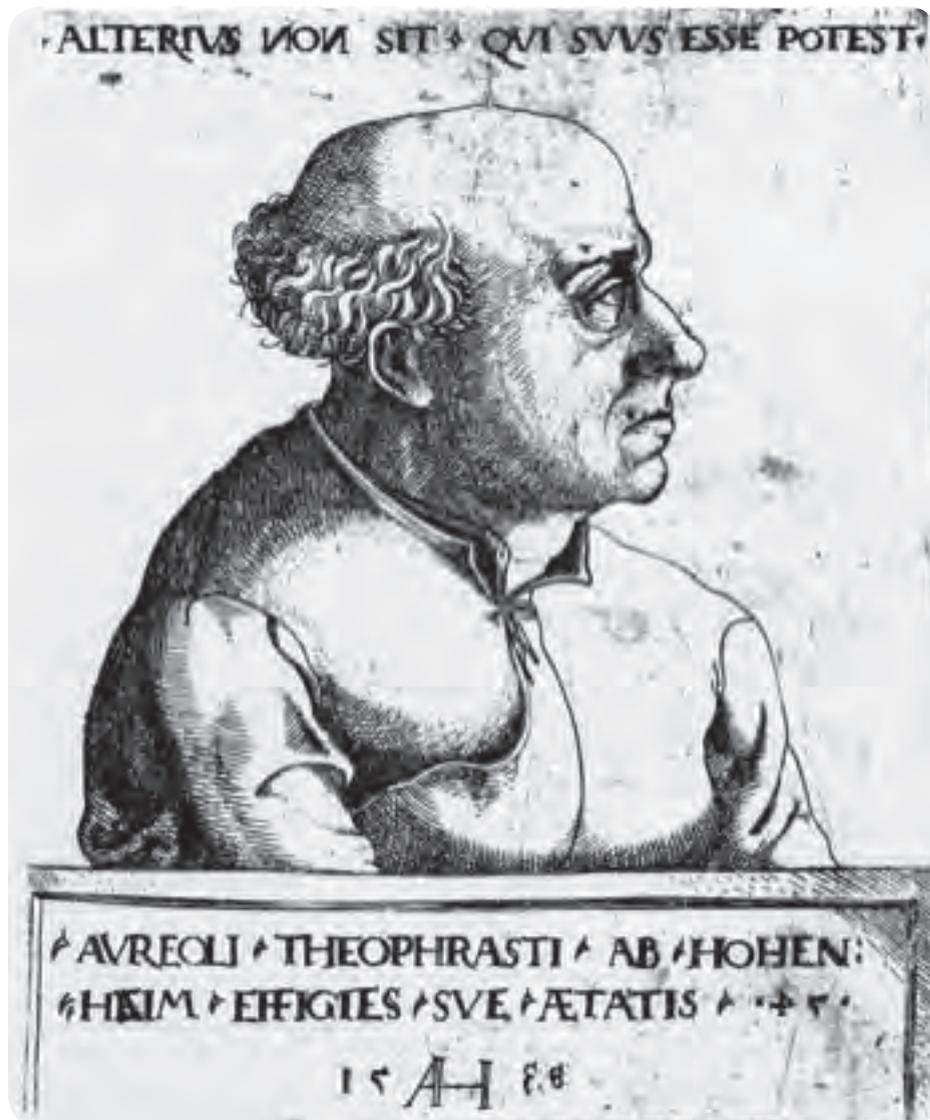
[...] vivía como un puerco, se vestía como un cochero y disfrutaba de la canalla más ínfima y perversa [...] todos sus libros parecen haber sido escritos mientras estaba borracho.

Estas dos visiones de Paracelso no son opuestas ni incompatibles, y en su caso me parecen complementarias. Veamos rápidamente por qué.

Paracelso nació en Einsiedeln, Suiza. Su padre era un médico modesto y de carácter retraído, quien desde muy temprano permitió que su hijo lo acompañara en sus visitas a los enfermos. Cuando Paracelso tenía apenas nueve años de edad perdió a su madre y un año después se fue a vivir con su padre a Willach, Austria, donde había sido nombrado médico del pueblo. Este sitio se encontraba vecino a las minas de plomo y los hornos de los Függer. Ahí fue en donde Paracelso desarrolló un interés genuino y permanente por la química, que iba a demostrar en muchos de sus escritos. También en estas minas se iniciaron sus teorías sobre la enfermedad. Cuando llegó el momento, Paracelso viajó a Ferrara, Italia, a estudiar medicina y, según él dijo después, ahí se graduó de médico, aunque nunca se han encontrado documentos que lo confirmen, y cuando lo acusaron de ejercer la profesión sin derecho a ello, su respuesta fue: “Pero ¿cuál es el camino correcto? ¿Galeno y Avicena, o la naturaleza? Yo he entrado a través de la puerta de la naturaleza. Ha sido su luz, y no la lámpara de un boticario, la que ha iluminado mi camino”.

Después de participar como médico en varias de las guerras europeas de esos tiempos logró que lo nombraran médico oficial en Basilea, gracias a la influencia del editor Johannes Frobenius, a quien supuestamente curó de una enfermedad en una pierna (pero Frobenius murió menos de un año después). Pronto, Paracelso se enemistó con los profesores de la escuela de medicina, entre otras cosas porque no daba sus conferencias en latín sino en el dialecto suizo-alemán, constantemente criticaba en forma soez a Hipócrates, a Galeno y a Avicena (máximas autoridades para los profesores), y el día de San Juan arrojó el *Canon* de Avicena a la tradicional hoguera. En lugar de apoyarlo, los estudiantes también lo aborrecían; lo bautizaron como “Cacofrastus” y le escribieron un poema insultante que se suponía enviado por Galeno desde el infierno. Finalmente, con todo el mundo

Figura 5.  
PARACELSO (1493-1541).



en su contra, se vio obligado a abandonar precipitadamente Basilea, dejando atrás todos sus escritos.

Paracelso continuó viajando toda su vida, repitiendo siempre la misma secuencia de hechos, como si se tratara de una comedia bien ensayada: donde quiera que iba llegaba precedido por leyendas de curas milagrosas, de modo que lo recibían con los brazos abiertos; su conocimiento de la medicina resultaba pronto en varias curaciones y durante un breve periodo parecía que el viajero había encontrado un sitio seguro y permanente. Pero su naturaleza violenta y pendenciera decretaba lo contrario. Con lenguaje abusivo y hasta obsceno acusaba a otros médicos de ser charlatanes, ignorantes, estafadores, asnos certificados, etc., se asociaba con vagabundos y malhechores, pasaba las noches en las tabernas comiendo y bebiendo demasiado, y cuando los médicos de la ciudad se cansaban y se disponían a pelear, Paracelso perdía también el apoyo de las autoridades y al final tenía que salir huyendo, al amparo de las sombras y dejando detrás todas sus pertenencias. Su camino fue muy duro y muy difícil, lleno de fracasos y sinsabores, y con muy pocos momentos de satisfacción. Falleció en Salzburgo, a los 48 años de edad. El retrato de Hirschvogel, hecho dos años antes de su muerte, lo muestra con aspecto de envejecimiento prematuro; Sudhoff piensa que murió de cáncer, sus compañeros de viaje atribuyeron su muerte a una sobredosis del famoso elixir que suponían en su posesión y sospechaban que escondía en el puño de su enorme espada, sus enemigos difundieron el rumor de que había muerto a consecuencia de los golpes recibidos en un pleito de taberna.

En su juventud Paracelso publicó un pequeño librito llamado *Volumen medicinae paramirum*, en donde presenta una de sus primeras teorías de la enfermedad (porque emitió varias), basada en las llamadas *Cinco Entidades*, que en realidad son las cinco causas de los distintos padecimientos: la primera son las estrellas (*Ens astri*), la segunda es el medio ambiente (*Ens veneni*), la tercera es la complexión humana (*Ens naturale*), la cuarta es el espíritu (*Ens spirituale*) y la quinta es Dios (*Ens Dei*). Cuatro años después, Paracelso publicó una ampliación de sus ideas con algunos cambios en el libro *Opus Paramirum* (véase figura 6) que incluye la causa de la putrefacción de la materia y que lo lleva a un concepto totalmente diferente de la enfermedad. Postula que la causa del crecimiento y de la vejez no eran ni los humores ni las estrellas sino el material que llena todo el universo. Entonces ya se aceptaba que éste estaba constituido por dos elementos o sustancias básicas, el sulfuro (los espíritus) y el mercurio (los líquidos); Paracelso agregó las sales (las cenizas) como otro componente básico de todos los cuerpos. El sulfuro representaba los cuerpos gaseosos y combustibles, pero también las fuerzas del alma, o sea el principio de la energía; el mercurio tomaba el lugar de los elementos líquidos y de las fuerzas intelectuales; finalmente, las sales eran los componentes de las cosas sólidas y el principio de la materia. Estas tres sustancias constituyeron la unión

Figura 6.  
EL LIBRO *OPUS PARAMIRUM*, DE PARACELSO.

**Practica Teutsch auff das**  
**M. D. XXXV. Jar. durch den**  
hochgelehrten Theophrastum Paracelsum / Die seyen Kun-  
ste der Arzney vnd Astronomey / Doctor / dem gemeinen  
menschen zu nutz gepriacticert / vnd außgangen.  
Mars. Venus.



del hombre con el universo y a través de ellas participaba en el metabolismo de la naturaleza; donde la enfermedad era el resultado de trastornos en el equilibrio de estas sustancias. Si el mercurio se “volatiliza” en el hombre, éste puede perder sus capacidades mentales; si se “subliman” las sales del cuerpo, el organismo se corroe y se produce dolor, etcétera.

De estas y muchas otras teorías imaginarias, fantásticas e ininteligibles, unas originales de Paracelso y otras atribuidas espuriamente a él, Pagel resumió las siguientes ideas médicas sorprendentemente modernas: 1) la enfermedad se reconoce como una entidad concreta, que puede verse, sentirse y examinarse; 2) la enfermedad es exógena; 3) las enfermedades pueden definirse en términos químicos; 4) el proceso es específico, un verdadero proceso químico; 5) la enfermedad es un proceso local, que puede generalizarse. Estas ideas eran radicalmente opuestas a las clásicas de Hipócrates, Galeno y Avicena, que Paracelso combatió vigorosamente.

Hasta el final, Paracelso fue fiel a su destino; en sus adivinanzas y esquemas imaginarios estuvo más cerca de la verdad que ningún otro, pero sin llegar a conocer nada de verdad. Parado en el umbral del Renacimiento, Paracelso pertenece en cuerpo y alma a la Edad Media, sus derechos a la inmortalidad se derivan de su lucha solitaria y desesperada contra la autoridad dogmática. Con apoyo y en prolongación de sus ideas, en los dos siglos siguientes se desarrolló en el mundo occidental el movimiento médico conocido como la iatroquímica, en el que van Helmont, Franciscus Sylvius, Thomas Willis y otros más hicieron sus contribuciones fundamentales y lograron prevalecer en el pensamiento médico, hasta que en el siglo XVIII surgió la iatromecánica y una vez más cambió la teoría general, y con ella la práctica de la medicina.

## EPISODIO 2: DESPUÉS DE WATSON Y CRICK

Para ilustrar el estado actual de las relaciones entre la química y la medicina voy a referirme, también muy brevemente, al impacto que han tenido los descubrimientos de la estructura molecular y de las funciones de los ácidos nucleicos conocidos como ácido desoxirribonucleico (DNA, por sus siglas en inglés) y ácido ribonucleico (RNA, por sus siglas en inglés) en la profesión médica. Una de las primeras demostraciones experimentales de que los ácidos nucleicos tenían algo que ver con la expresión de diferentes funciones biológicas fue la de Avery *et al.*, en 1944, quienes propusieron que el “factor de transferencia” del neumococo era el DNA. Este factor se extraía de una cepa de la bacteria que tenía la cápsula lisa; cuando el extracto se agregaba a un cultivo de una cepa relacionada pero sin ese tipo de cápsula, algunas bacterias se “transformaban”, o sea que adquirirían la cápsula lisa y todas sus células descendientes mostraban la misma cápsula. En esa época todavía

no se demostraba que las bacterias tenían genes, lo que pronto después fue revelado por Lederberg y Tatum. De todos modos, Crick comenta:

*Se ha dicho que los trabajos de Avery y sus colegas fue ignorado y despreciado. Naturalmente hubo una mezcla de reacciones a sus resultados, pero no puede decirse que nadie los conocía. Po ejemplo, ese agosto y habitualmente conservador organismo, la Real Sociedad de Londres, otorgó la Medalla Copley a Avery en 1945, citando específicamente su trabajo sobre el factor de transformación.*

Es interesante que ni Watson ni Crick eran químicos o médicos. Antes de asociarse para investigar la estructura del DNA ninguno de los dos tenía experiencia personal, ni en la metodología necesaria para trabajar en el campo ni conocimientos especializados en el área. Watson era biólogo y llegó a Cambridge después de pasar una temporada en el laboratorio de Herman Kalckar, en Copenhague, estudiando el metabolismo de algunos aminoácidos, atraído por la posibilidad de aprender a analizar estructuras proteicas por medio de difracción de rayos X en el laboratorio de John Kendrew. Crick era físico, y también se incorporó a ese laboratorio con intereses semejantes, estimulado por los estudios de los Bragg sobre cristales de sales inorgánicas con la misma técnica. Sin embargo, en cuanto se formó la pareja (figura 7) se inició su colaboración para determinar la estructura molecular del DNA, con la seguridad de que sería útil para entender cómo funcionan los genes. Los obstáculos a vencer eran enormes: Crick todavía no terminaba su tesis doctoral y debía dedicarle gran parte de su tiempo a esa tarea y Watson estaba encargado de cristalizar mioglobina para estudiarla por medio de difracción de rayos X. Pero el mayor problema es que ninguno de los dos tenía acceso directo a los patrones de difracción de rayos X del DNA; ambos debían apoyarse en trabajos previos ya publicados por Astbury, y sobre todo los que estaban realizando en esos momentos Maurice Wilkins y Rosalind Franklin, los que sólo conocían de oídas y por presentaciones en seminarios. Armados con la información publicada por Chargaff, sobre la composición química del DNA, y con una gran ingenuidad, Watson y Crick comenzaron a hacer modelos teóricos de la molécula, usando para eso dibujos de los componentes en papel y una tijera para recortarlos; ellos no hicieron un solo experimento con DNA, no tomaron ninguna de las placas de difracción de rayos X necesarias. Simplemente, tomaron los elementos que tenían a la mano, o sea la composición química del DNA, la regla de Chargaff (cantidades iguales de las parejas de nucleótidos A-T y G-C) y los patrones de difracción de rayos X del DNA, y construyeron el modelo teórico que incluía todos esos datos en forma coherente. Con esta información, el 25 de abril de 1953 publicaron un primer artículo en *Nature*, de sólo página y media (figura 8) en el mismo número en el que Wilkins *et al.*, y Franklin y Gosling publicaron sendos trabajos con los patrones de

Figura 7.  
FRANCIS CRICK (IZQUIERDA) Y JAMES WATSON (DERECHA).



Figura 8.  
EL ARTÍCULO ORIGINAL DE WATSON Y CRICK SOBRE LA ESTRUCTURA MOLECULAR DEL DNA.



difracción de rayos X del DNA que Watson y Crick usaron para su artículo, y otros más que éstos no conocían pero que confirmaban su modelo. Un mes más tarde, el 30 de mayo, apareció en *Nature* otro artículo de Watson y Crick en el que, otra vez sin haber hecho un solo experimento, proponen el modelo semiconservativo de replicación del DNA para explicar el mecanismo de autorreplicación de los genes. La demostración de este mecanismo se hizo cuatro años más tarde, con el clásico experimento de Meselson y Stahl, en el que introdujeron la técnica de separación de moléculas por gradiente de densidad, usando DNA ya no de bacteriófago sino de la bacteria *Escherichia coli*, por lo que la replicación semiconservativa es válida para cromosomas completos.

La trascendencia del descubrimiento de Watson y Crick, de la estructura molecular del DNA y de su mecanismo de replicación, no puede exagerarse.

No sólo transformó la biología y sirvió de base para el desarrollo de una nueva disciplina, la biología molecular, sino que permitió a la genética dar un salto cuántico al incorporar el nivel molecular en su repertorio de niveles de análisis, y estableció de manera definitiva la realidad de la evolución biológica, que a partir de entonces ha dejado de ser una “teoría”. Parte de este impacto lo describió Evelyn Fox Sellaer en su libro *Making Sense of Life*, como sigue:

Los diez años que siguieron al anuncio espectacular de Watson y Crick en 1953 no han sido igualados en la historia de la biología del siglo xx en cuanto al dramatismo de los descubrimientos que presenciaron. Al final de este periodo ya se tenía una idea muy clara de la estructura química del material genético y del mecanismo de su replicación, del proceso por el cual se transcribe la secuencia de los nucleótidos y se traduce en secuencias de aminoácidos, y de por lo menos un mecanismo por el que se regula la velocidad de síntesis de diferentes proteínas. También se había obtenido mucha más información sobre los detalles bioquímicos de las vías metabólicas que mantienen funcionando la maquinaria de la vida.

El éxito de la biología molecular ha tenido muchos resultados positivos y otros ambivalentes. Por un lado, el desarrollo de la biotecnología ha permitido generar numerosos productos recombinantes, y ha cambiado muchas de las técnicas agrícolas tradicionales, mejorando considerablemente la cantidad y calidad de los alimentos para animales y seres humanos. También está revolucionando cada vez más la comprensión y el manejo de muchas enfermedades, entre ellas, diferentes tipos de cáncer. El avance de la tecnología nos permite ahora secuenciar el genoma completo de un ser humano en un par de días, con lo que hemos confirmado que cada uno de nosotros es único, que compartimos todos los genes que nos hacen humanos pero que las combinaciones de estos genes y, sobre todo, los niveles de expresión de muchos de ellos son diferentes en cada uno de nosotros. Y cada vez es más claro que de esas diferencias depende en gran parte la manera como

respondemos a distintas medicinas, cómo reaccionamos a diferentes tratamientos. Ya podemos vislumbrar el día en que el diseño del manejo de una enfermedad determinada deba obedecer a la constitución genética específica del sujeto afectado, o sea la medicina individual. Esto ya ocurre en distintos tipos de cáncer y en la respuesta a algunas sustancias químicas que se usan en varias infecciones.

Pero la tendencia a considerar todo lo nuevo como mejor y más adecuado que las prácticas más tradicionales es muy humano y rebasa con mucho el ámbito de la ciencia, sobre todo cuando se ha transformado en un recurso tan popular en mercadotecnia. Sin embargo, un momento de reflexión basta para convencernos de que el sitio de la biología molecular no es *en vez de* la biología clásica sino *además de* ella. Aunque todos los fenómenos biológicos tienen un componente molecular forzoso, no todos tienen una explicación molecular. La revolución biológica iniciada por Watson y Crick no tiene por qué ser destructiva de nada, sino todo lo contrario.

#### CODA

Quiero terminar señalando que los organizadores de este simposio me invitaron a hablar de la química y la medicina, y que quizá algunos de ellos, y quizá también algunos de ustedes, se estarán preguntando qué tiene que ver todo lo que he dicho con la química y la medicina. Cuando me puse a pensar en el posible contenido de esta plática me asusté con su tamaño potencial, que me pareció monstruoso. Me dije: ¡Pero si casi toda la medicina actual es química! ¿Y ahora qué hago...? Al final, me he refugiado en la historia. He resumido para ustedes sólo tres puntos: 1) cómo era la medicina hasta antes de encontrarse por primera vez con el pensamiento químico; 2) cómo ocurrió ese primer encuentro, ejemplificado por Paracelso; y 3) cómo ocurrió uno de los últimos encuentros entre la química y la medicina, con el descubrimiento de Watson y Crick. Espero haber cumplido, muy a mi manera, con mi compromiso.



## La química de la calle: “drogas de diseño”

MARÍA ELENA MEDINA-MORA

El avance de la ciencia llega también a las calles y emergen nuevos químicos que hacen uso de la química sintética y de la computación. Son capaces de adaptar y desarrollar nuevas presentaciones de fármacos y combinar sustancias psicoactivas con el fin de satisfacer, en el mercado informal, una demanda que puede ser más o menos sofisticada. Este es el caso de la proliferación de las nuevas sustancias diseñadas que se ofertan a quienes buscan alterar su estado de ánimo. Las “drogas de diseño” sustituyen a sustancias naturales, algunas de las cuales se producen en lugares remotos como la cocaína y requieren de su traslado ilegal, otras se presentan como símiles de sustancias prohibidas formuladas a partir de sustancias o precursores no controlados y en ocasiones difíciles de identificar con las pruebas estándares de detección de drogas.

Este capítulo trata de las nuevas sustancias tipo estimulante y nuevas drogas psicoactivas sintéticas. Describe los tipos de sustancias y sus efectos y presenta las estadísticas de producción y consumo con énfasis en México, concluye con recomendaciones para las políticas públicas.

### LAS NUEVAS SUSTANCIAS: ANTECEDENTES

Los antecedentes de estas nuevas sustancias son los alucinógenos sintéticos descubiertos en el siglo pasado. Se trata de estructuras químicas parecidas a los neurotransmisores; se piensa que logran sus efectos interfiriendo temporalmente con su acción al ligarse a sus sitios receptores. Como su nombre lo indica causan alucinaciones: distorsiones de la percepción de la realidad. Bajo su influencia las personas ven imágenes, escuchan sonidos, y tienen sensaciones que parecen reales pero que no lo son. Ciertos alucinógenos producen cambios emocionales rápidos. Algunos ejemplos son la dietilamida del ácido lisérgico-d (LSD, por sus siglas en inglés) descubierta en 1938 y la fenciclidina (PCP, por sus siglas en inglés) desarrollada en los

años cincuenta como un anestésico discontinuado al poco tiempo por sus efectos adversos secundarios, fue introducido para su venta en las calles en los años sesenta. La LSD al igual que sus similares naturales, la psilocibina (que se encuentra en los hongos alucinógenos) y la mezcalina (en el peyote), interrumpe la interacción de las células con la serotonina, que es un neurotransmisor que controla los sistemas conductual, perceptivo y regulatorio. Afecta el estado de ánimo, el hambre, la temperatura corporal, la conducta sexual. La PCP actúa a través de un receptor, el glutamato que está asociado con la percepción del dolor, la percepción y la memoria (NIDA, 2015b).

Con la LSD los sentidos se cruzan y la persona reporta experiencias como escuchar los colores o ver los sonidos. La experiencia o “viaje” dura alrededor de 12 horas y están asociados a un fenómeno conocido como *flashbacks*, es decir, la persona vuelve a experimentar los efectos de la sustancia sin haberla ingerido nuevamente, ocurren desde varios días después de la ingesta y se han documentado casos que lo experimentan hasta un año después, son inesperados, por lo general no hay previo aviso y pueden ser persistentes (NIDA, 2015b).

La PCP es una droga disociativa capaz de distorsionar imágenes visuales y auditivas. Produce síntomas parecidos a la esquizofrenia, perturbaciones en el estado de ánimo y a largo plazo puede afectar la memoria y la capacidad de hablar y pensar (NIDA, 2015b).

#### NUEVAS SUSTANCIAS:

##### TIPO ESTIMULANTE Y DROGAS PSICOACTIVAS

Entre las sustancias de esta nueva era, clasificadas como nuevas sustancias tipo estimulante y nuevas drogas psicoactivas encontramos a las metanfetaminas. Son sustancias con alto potencial adictivo y estrecha relación con las anfetaminas pero con efectos más prolongados y tóxicos en el sistema nervioso central. Incrementa la cantidad del neurotransmisor dopamina vinculada con la motivación por la recompensa, la experiencia de placer y el funcionamiento motor. Aumenta el estado de alerta y la actividad física, disminuye el apetito. El uso crónico puede llevar a ansiedad, confusión, insomnio, y conducta violenta, y en consumidores crónicos; cambios estructurales en el cerebro en áreas asociadas con la memoria y las emociones. Algunos de los cambios en el cerebro persisten mucho tiempo después de que se dejan de usar, y la recuperación puede tardar hasta un año (NIDA, 2015c). Quienes consumen la presentación conocida como *Crystal* reportan usarla en fiestas para permanecer despiertos varios días, también mencionan deseo sexual, pensamiento acelerado y verborrea (Martínez Arroyo, 2015).

La 3,4-metilendioxitmetanfetamina (MDMA) o éxtasis, es una droga sintética psicoactiva parecida a las anfetaminas, drogas estimulantes y a la mezcalina, droga alucinógena. Incrementa la actividad de tres neurotransmisores, la serotonina, la dopamina y la norepinefrina produciendo sensaciones de energía incrementada, euforia, calor, empatía hacia otros y distorsiones en las percepciones sensoriales y de tiempo. Sus efectos sobre las emociones y la interacción con otros probablemente se deban a la liberación de grandes cantidades de serotonina, pues desencadena liberación de las hormonas oxitocina y vasopresina, que juegan un papel importante en el amor, la confianza, la excitación sexual y otras experiencias sociales. Agota el suministro de serotonina lo que hace que se presenten: confusión, depresión, problemas para dormir, deseo vehemente de consumir la droga y ansiedad (NIDA, 2015d).

Entre las drogas más recientes encontramos aquellas que simulan cannabinoides, el *Spice* contiene materiales de plantas secas y picadas, así como aditivos químicos que son los responsables de sus efectos psicoactivos. Los consumidores de esta droga reportan experiencias similares a las producidas por la marihuana y a veces más fuertes, y que incluyen estado de ánimo elevado, relajación y alteración de la percepción. En algunos casos se han manifestado efectos psicóticos, ansiedad extrema, paranoia y alucinaciones (NIDA, 2015d).

Otras sustancias clasificadas en estas nuevas drogas son las catinonas sintéticas que evocan efectos estimulantes y empatogénicos, similares a los de los estimulantes tipo anfetamínicos (UNODC, 2014b). Las catinonas sintéticas que se distribuyen en el mercado ilegal como “sales de baño” incluyen la 3,4-metilendioxirovalerona (MDPV), la mefedrona (*Drone*, *Meph* o *Meow Meow* en inglés) y la metilona, pero hay muchas más. Todavía se desconoce cómo estas sustancias afectan al cerebro humano y las propiedades pueden variar un poco entre una y otra catinona. Químicamente se parecen a las anfetaminas (como la metanfetamina) así como a la MDMA.

Los efectos alucinantes que con frecuencia reportan los consumidores de las sales de baño son similares a los de otras drogas como la LSD o la MDMA que elevan los niveles de la serotonina, otro neurotransmisor. Un análisis reciente de los efectos de la mefedrona y la metilona en ratas demostró que estas drogas aumentan los niveles de serotonina de una manera similar a la MDMA.

Las reacciones que se dan a conocer comúnmente en las personas que han requerido atención médica después de usar las sales de baño incluyen síntomas cardíacos (como latidos rápidos del corazón, presión arterial alta y dolores en el pecho) y síntomas psiquiátricos como paranoia, alucinaciones y ataques de pánico. Los pacientes con el síndrome conocido como “delirio con excitación” como resultado de tomar las sales de baño, también pueden sufrir de deshidratación, deterioro del tejido muscular esquelético e insuficiencia renal. En varias ocasiones,

la intoxicación con varias de las catinonas sintéticas, incluyendo la MDPV, la mefedrona, la metedrona y la butilona ha resultado en la muerte (NIDA, 2015b).

#### LOS MECANISMOS DE CONTROL DE LAS NUEVAS SUSTANCIAS

El desarrollo de las nuevas sustancias tipo estimulante y nuevas drogas psicoactivas es más rápido que el sistema internacional en su proceso de identificar sustancias con potencial riesgo, recolectar evidencia de daños a la salud, incorporarla en las listas de sustancias controladas que los países deben de supervisar e instrumentar los sistemas de vigilancia internacional de su producción y transporte, ya sea de las sustancias mismas o de sus precursores (INCB, 2015).

Los primeros esfuerzos de control legal se dieron en el siglo XIX que derivaron de las primeras manifestaciones de preocupación de los países industrializados por la disponibilidad irrestricta y sus riesgos. La Comisión de Shanghai de 1909 se originó por la preocupación de la epidemia de opio en China. Se consideró que el uso no médico de opio debería regularse cuidadosamente o aun prohibirse, que la producción irrestricta, la distribución y el consumo podrían ser un peligro grave y se llamó a los gobiernos a hacer esfuerzos de control. Hay una coincidencia de los intereses de tres países: China, Gran Bretaña y Estados Unidos y 13 países firman.

La Convención Internacional del Opio de 1912 en La Haya, estableció el control de drogas narcóticas como parte de la ley internacional en una base multilateral. Estos esfuerzos culminaron en las Convenciones Internacionales que nos rigen ahora, la de 1961 (y su protocolo de modificación de 1972), orientada al control de cultivo de opio, coca y *cannabis*, a la prevención de producción ilícita, tráfico y uso, y al tratamiento y reincorporación social de los enfermos. La Convención Internacional de 1971 orientada al control de estimulantes del sistema nervioso central, como los hipnóticos sedantes y los alucinógenos y la Convención Internacional de 1988 que define actividades de tráfico, incluye lavado de dinero y actividades relacionadas con los precursores.

Los organismos que participan en el mecanismo de control son la Comisión de Estupefacientes (CND, por sus siglas en inglés) formado por el Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas en 1946 como el organismo central responsable de la política sobre asuntos de drogas. Este organismo celebra reuniones anuales y entre otras actividades analiza la situación mundial del problema, propone medidas para fortalecer el sistema internacional de control que incluye cambios en las listas de control de drogas.

Participa también el organismo rector del programa de la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC, por sus siglas en inglés)

como órgano ejecutivo y la Junta Internacional de Fiscalización de Estupefacientes (JIFE) como organismo cuasi judicial encargado de vigilar y promover el cumplimiento de los tratados. La función de la JIFE es alentar el diálogo con los gobiernos, labor que se centra en seis aspectos: velar por limitar el cultivo, la producción, la fabricación y la utilización de drogas a los fines médicos y científicos; garantizar la disponibilidad de drogas para fines médicos y científicos y determinar deficiencias en la aplicación de los tratados de fiscalización internacional de drogas; prevenir el cultivo, la producción, la fabricación y el tráfico ilícitos de drogas y su uso indebido y evaluar productos químicos y recomendar, cuando proceda, / que sean sometidos a fiscalización internacional / y someter a vigilancia los productos químicos / y prevenir su desviación hacia canales ilícitos.

La Convención Única sobre Estupefacientes de 1961 y su protocolo de modificación de 1972 establece los órganos de competencia y el procedimiento para incluir nuevas drogas en el control internacional y para transferir drogas controladas de una lista a otra o eliminarla de las listas, para ello se toma en cuenta la opinión de la Organización Mundial de la Salud (OMS). La JIFE administra el sistema de previsiones. El procedimiento señala que la OMS o cualquier Estado Miembro puede proporcionar información sobre necesidad de cambio en listas, se informa al Secretario General y con información base que sustente, la CND, después de tener opinión de la OMS, modifica las listas. Este largo procedimiento tarda en incorporar a nuevas sustancias, especialmente a reunir la evidencia del daño en relación con los potenciales beneficios médicos.

## EL MERCADO DE LAS NUEVAS SUSTANCIAS

De acuerdo con la UNODC, en 2014 se reportaron 450 sustancias tipo estimulante y nuevas drogas psicoactivas, de este grupo 69 fueron formulaciones reportadas por primera vez, un crecimiento considerable si se piensa que en 2010 se dieron a conocer tan sólo 156 nuevas sustancias sintéticas, de las cuales 42 por primera vez. El mercado para estas drogas está dominado por las metanfetaminas; los decomisos en cinco años aumentaron en 158%, su mayor mercado está en Asia del Este y del Sureste. Su presentación como *Crystal* está en aumento en partes de América del Norte y Europa. Se estima que hay 18.8 millones de consumidores de éxtasis, cuyos decomisos disminuyeron en 15% y 33.9 millones de los que usan anfetaminas cuya producción se ha mantenido estable (UNODC, 2015).

Estados Unidos y México producen estas sustancias para el mercado informal, en Europa, y otros países como Oceanía, Asia del Este y del Sureste, África Central y Centro y Sudamérica, se reporta manufactura desde antes de 2011 (Global Synthetic Drug Assessment, UNODC, 2014). Muchos países han instru-

mentado medidas de control de los precursores que se usan para producir estas sustancias de acuerdo con las Convenciones Internacionales (INCB, 2015).

De acuerdo con la UNODC, en años recientes se ha incrementado el uso de formas alternativas de precursores conocidos como preparaciones farmacéuticas que contienen pseudoefedrina o d-efedrina y efedrina en su preparación, algunos de estos precursores han sido incorporados a las listas de sustancias controladas, pero los productores en el mercado informal pueden usar otras sustancias no controladas como el alfafenilacetoacetnitrilo (APAAN, por sus siglas en inglés) (UNODC, 2014b).

Martínez Arroyo *et al.* (2012), describen los métodos que los distribuidores en México utilizan para mezclar sustancias para producir efectos estimulantes, ya sean estimulante y depresor o estimulante y alucinógeno para satisfacer los requerimientos de los clientes consumidores, para esto buscan la información en Internet, la prueban ellos mismos y revisan la satisfacción de los clientes en cuanto a haber conseguido los efectos deseados. “Puedes mezclar desde coca con éxtasis o metas con heroína, o le pones goteo de LSD a unas tachas y le vas probando.” (Martínez Arroyo *et al.*, 2012, p. 478.)

Los efectos a la salud de estas sustancias incluyen efectos no deseados como los derivados de sustancias tóxicas incluidas en las mezclas o la mala trituración de las preparaciones que se usan aspiradas, como las mezclas a la cocaína lo que produce serios impactos en el pulmón.

#### LA EXTENSIÓN DEL USO DE LAS NUEVAS SUSTANCIAS

De acuerdo con el informe mundial de drogas (UNODC, 2015), el consumo de estimulantes tipo anfetamínico se ha incrementado globalmente, se tiene poca información acerca de la extensión del consumo de las nuevas drogas con efectos psicoactivos pero se asume que puede ser creciente dada la proliferación de sustancias que han sido reportadas. El mercado sigue estando dominado por las metanfetaminas. La forma cristalina está aumentando en partes de Norteamérica y Europa. El mercado de éxtasis es menor que el mercado global de metanfetaminas y se mantiene confinado a pocas regiones y parece estar declinando en las Américas en donde los decomisos disminuyeron en 81% entre 2009 y 2012.

La UNODC recibe información de los países sobre las drogas de abuso. Los cannabinoides sintéticos dominaron los reportes entre 2008 y 2013, 28% y las catinonas, 25%. Los reportes de cannabinoides sintéticos aumentaron casi al doble entre mediados de 2012 y 2013. Las estimaciones del consumo de estas sustancias es aún incipiente, esto se debe a que son de aparición reciente, en las calles pueden tomar diferentes nombres y su registro no es aún muy exacto (Global Synthetic Drug Assessment, UNODC, 2014).

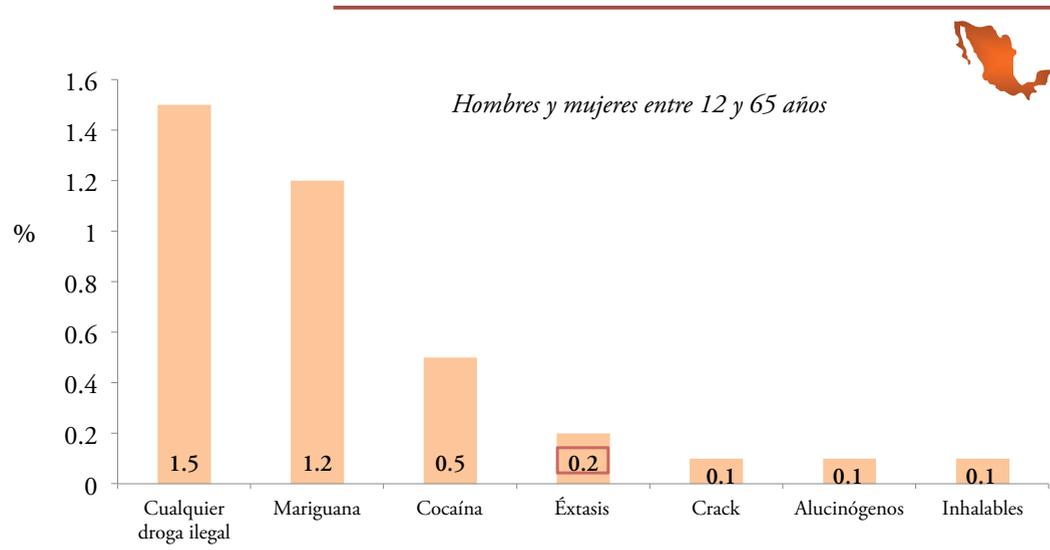
En Estados Unidos y en México se ha reportado una extensa producción de metanfetaminas. En México el decomiso aumentó de 341 kg en 2008 a 44 t en 2012 (UNODC, 2014b). Los laboratorios desmantelados en México han aumentado de 20 en 2001 a 260 en 2012, pero son significativamente menores de lo que se ha reportado en Estados Unidos, 13 000 en 2012. Mucha de la producción de México tiene como destino el mercado especialmente de Estados Unidos en donde han disminuido los precios en 70% y aumentado la pureza, en más de 130%. Los decomisos en la frontera aumentaron de 2.3 t en 2008 a más de 10.6 t en 2012. El aumento en la entrada de metanfetaminas a Estados Unidos, el hecho de que los precios hayan disminuido en 70% y aumentado la pureza, en más de 130%, indica un aumento en la disponibilidad en aquel país. Los decomisos de éxtasis en México se han mantenido por debajo de 3 kg; y han disminuido casi en 85% en Estados Unidos (Global Synthetic Drug Assessment, UNODC, 2014). El mercado de drogas ilegales en México y América del Sur sigue concentrado en marihuana y cocaína (UNODC, 2014b).

De acuerdo con la Encuesta Nacional de Adicciones (ENA) de 2011, solamente 0.2% de la población reportó haber consumido estimulantes tipo anfetamínico, comparado con 1.2% que consumió marihuana y 0.5%, cocaína. La marihuana representa 80% del consumo de estas drogas y hay 2.5 usuarios de cocaína por cada uno de estimulantes tipo anfetamínico (véase figura 1) (Villatoro *et al.*, 2012). El mayor consumo se observa en la región Noroccidental, seguido por la región Nororiental y la ciudad de México (véase figura 2).

Las encuestas de población escolar en la ciudad de México muestran un bajo índice de consumo en primero de secundaria (1% reporta haberlos consumido alguna vez) aumenta hasta alcanzar su máximo nivel en segundo y tercer años de preparatoria (5.5 y 5.4%, respectivamente) (Villatoro *et al.*, 2012). La proporción de la población que entra a la universidad y que reporta haber consumido alguna vez estas sustancias es menor respecto a la de la preparatoria (3.8%) y se mantiene estable a lo largo de la licenciatura (Villatoro *et al.*, 2012).

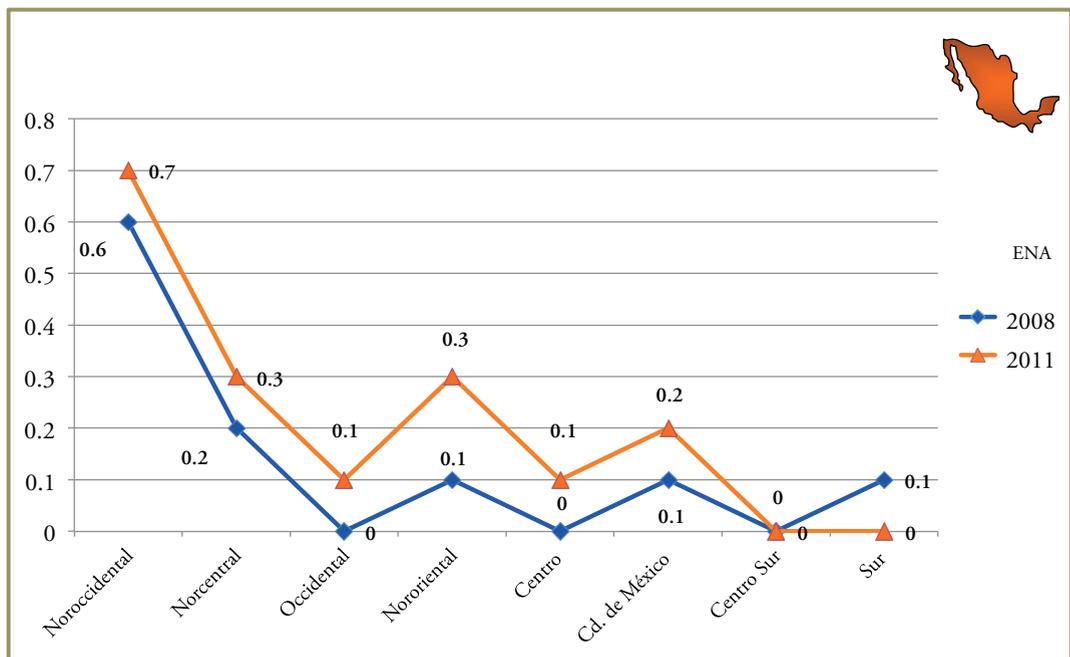
La distribución del consumo por sexo, muestra de manera relativa, pocas diferencias en la secundaria, en el primer año, 1.2% de los hombres y 0.8% de las mujeres reportan haber consumido, en tercero de secundaria hay más mujeres que dicen haberlas usado (4%) respecto de los hombres (3.4%); en segundo de preparatoria sube a 5.6% en los hombres y 5.4% en las mujeres. Las diferencias aparecen en tercero de preparatoria con 6.7% de los hombres y sólo 4.1% de las mujeres reportan haberlas usado (Chávez *et al.*, 2013). En ambos grupos hay más reporte de consumo en la preparatoria que en la universidad (4.3 y 3.4% en ellos y ellas, respectivamente), pero en los hombres el consumo aumenta en forma paulatina hasta alcanzar 6% en el cuarto año en tanto que en las mujeres disminuye poco a poco hasta llegar a 1.7% (Chávez *et al.*, 2013).

Figura 1.  
ENA 2011: CONSUMO DE DROGAS POR ORDEN DE PREFERENCIA.



Villatoro, et al., ENA 2011.

Figura 2.  
CONSUMO DE METANFETAMINAS EN EL ÚLTIMO AÑO POR REGIONES.  
POBLACIÓN TOTAL, 12 A 65 AÑOS.



Villatoro, INPRFM, Unidad de Encuestas en <http://www.uade.inpsiquiatria.edu.mx>

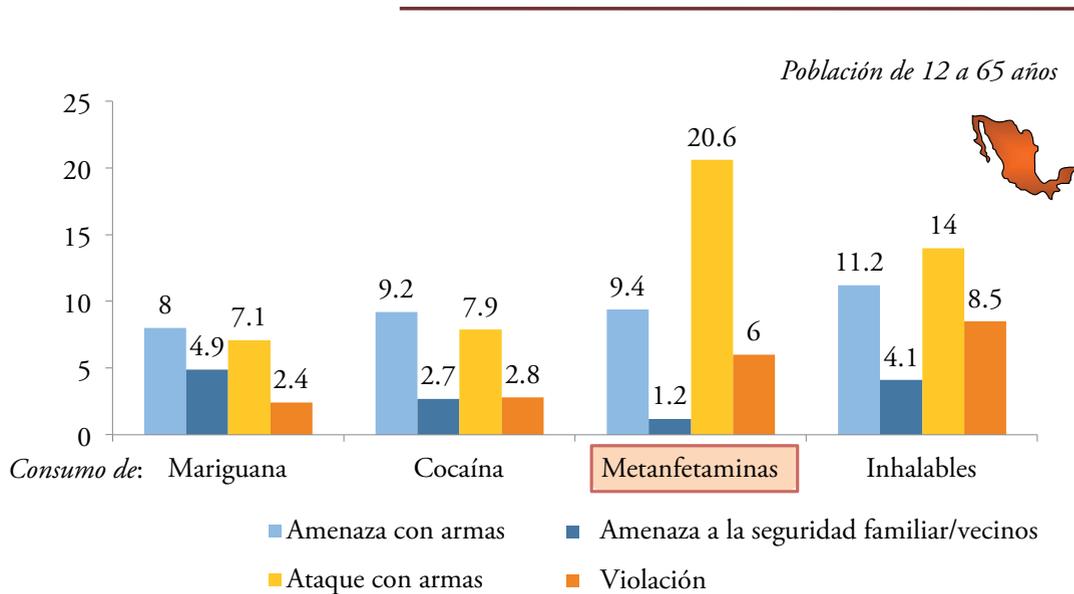
Las estadísticas de centros de tratamiento muestran que en los Centros de Integración Juvenil (CIJ), las metanfetaminas ocupan el séptimo lugar como droga de preferencia (15.4%) y el éxtasis, el décimo sólo por encima de la heroína, según el reporte de los pacientes atendidos en el segundo semestre de 2013 sobre su consumo alguna vez en la vida. Las metanfetaminas inician con 13.6% en 2004, y llegan a su máximo nivel en 2005 con 15.6% de los que las consumieron al menos una vez, disminuyen consistentemente hasta 2010 cuando alcanzan 10.5%, a partir de entonces vuelven a subir y alcanzan 15.4% respecto de los consumidores en 2013. El éxtasis inicia muy bajo con 3.8% y aumenta poco a poco cada año hasta llegar a 6.5% de los que consumieron en 2013. *Cannabis* representa 85% del consumo en esta población.

La mayor proporción de consumidores se reporta en el estado de Baja California, 51% de éstos llegaron a tratamiento en los CIJ por su uso en 2013, mostrando una reducción importante si se le compara con 2004, cuando 84% de los consumidores había reportado haber usado estas sustancias.

El Sistema de Vigilancia Epidemiológica en Adicciones (SISVEA), que incorpora a los centros manejados por los organismos de la sociedad civil que tienden a incluir a enfermos más graves, reporta que el cristal (*Crystal*) es la principal droga de impacto, es decir, aquella que lleva a tratamiento, en Baja California Sur, Sinaloa y Sonora. Los pacientes atendidos en los CIJ reportan a la marihuana como la principal droga de impacto a nivel nacional y en los dos últimos estados. En Baja California Sur se encontró que la heroína era la principal droga de impacto reportada por los pacientes en tratamiento registrados por SISVEA.

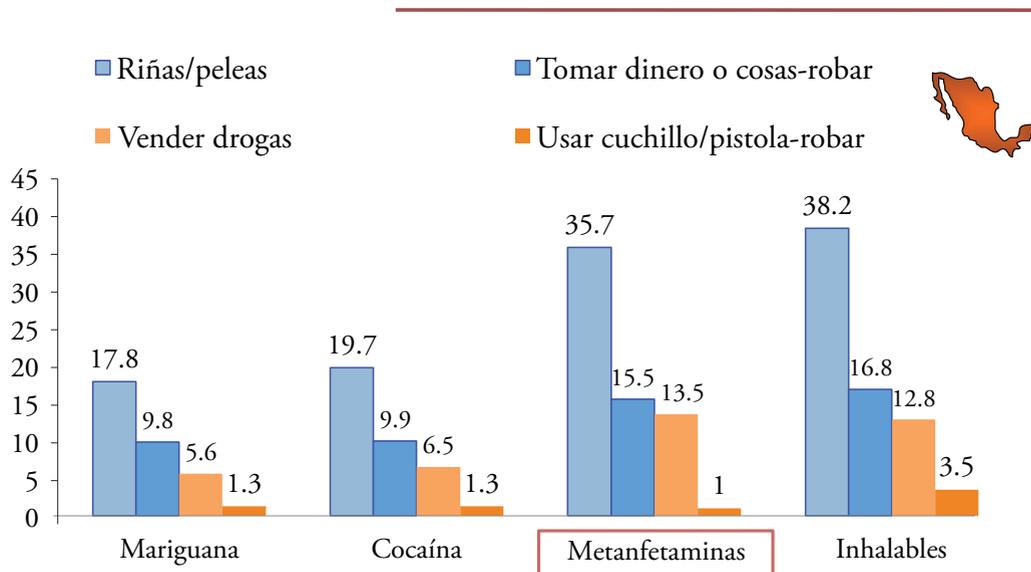
De acuerdo con la ENA de 2008, los consumidores de metanfetaminas viven en comunidades de mayor inseguridad y cometen a su vez más conductas antisociales en una proporción similar a la reportada para inhalables, pero superior a la reportada por los consumidores de marihuana y cocaína (véanse figuras 3 y 4). Cuando se compara a los consumidores de metanfetaminas con aquellos que dicen no haberlas usado, encontramos que los primeros cometen en promedio más conductas antisociales, cuando se analiza por sexo advertimos que esto ocurre sólo en los hombres (véase figura 5), comparados con los consumidores de cocaína, quienes también consumen metanfetaminas incurren en conductas de mayor violencia (véase figura 6).

Figura 3.  
RELACIÓN ENTRE SEGURIDAD EN LA COLONIA Y USO DE DROGAS POR TIPO DE SUSTANCIA.



ENA 2008. Proporción que contestó que los eventos sucedían con frecuencia o con mucha frecuencia.  
INPRFM, en <http://www.uade.inpsiquiatria.edu.mx>

Figura 4.  
RELACIÓN ENTRE TIPO DE DROGA QUE SE CONSUME Y CONDUCTAS ANTISOCIALES.



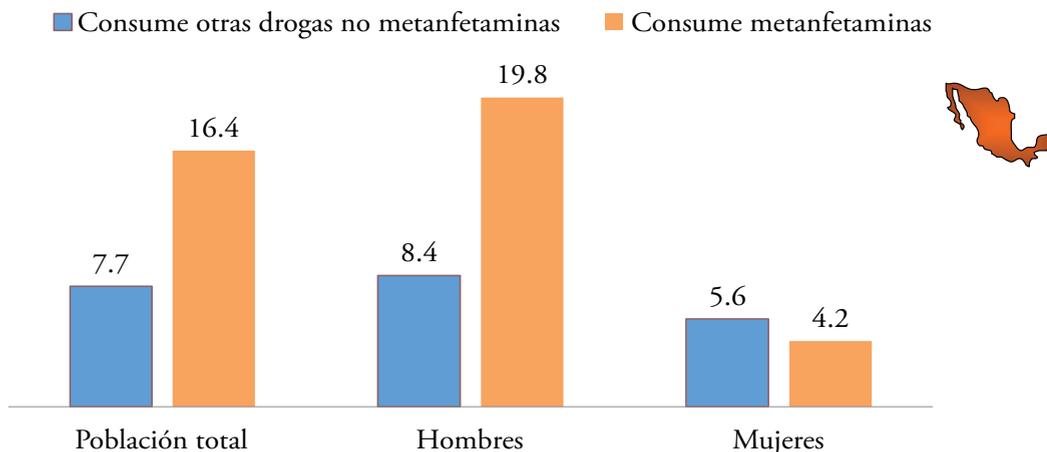
ENA 2008. Población de 12 a 65 años. INPRFM, en <http://www.uade.inpsiquiatria.edu.mx>



Figura 5.

¿SON DIFERENTES QUIENES INCLUYEN A LAS METANFETAMINAS ENTRE LAS DROGAS QUE CONSUMEN DE LOS QUE NO USAN ESTA SUSTANCIA?

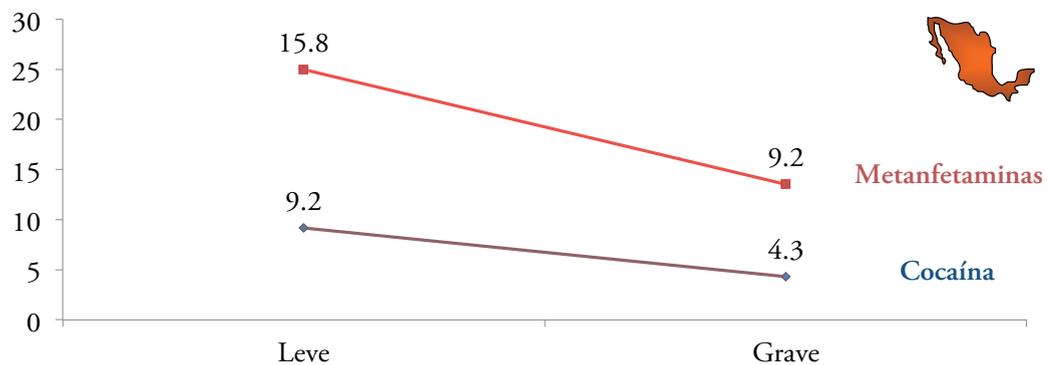
Población de 12 a 65 años



ENA 2008. Proporción de personas que reportaron una o más conductas antisociales. INPRFM, en <http://www.uade.inpsiquiatria.edu.mx>

Figura 6.

RELACIÓN ENTRE CONSUMO DE COCAÍNA Y METANFETAMINAS Y SEVERIDAD DE LA CONDUCTA ANTISOCIAL.



Incluye: *tomar dinero* o cosas valiosas que no le pertenecen y tomar parte en *riñas* o peleas.

Incluye: *atacar a alguien, usando algún objeto como arma, cuchillo, etc.; vender drogas como la marihuana, cocaína, etc., y usar un cuchillo o pistola para obtener algún objeto de otra persona.*

ENA 2008.



## CONCLUSIONES

Si bien las “drogas de diseño” no son nuevas, tienen sus antecedentes en la producción de la LSD que se descubre en los años treinta y que simulan los efectos de otras drogas naturales. Aparecen después los estimulantes tipo anfetamínico específicamente las metanfetaminas y el éxtasis que se producen en muchos lugares del mundo y se piensa que sustituyen a la cocaína que sólo se cultiva en la región andina en Sudamérica. Surgen ahora las nuevas sustancias con efectos psicotrópicos, que no están controladas, se trata de un fenómeno global. Las sustancias que más se reportan son las metanfetaminas, la *cannabis* sintética y las catinonas; el éxtasis en cambio, muestra tendencias a la baja.

Estos fenómenos ponen a prueba los sistemas de control internacional y obligan a un continuo monitoreo, no libre de retos, no hay fórmulas estándar, pueden usarse sustancias tóxicas, la forma de preparación tiene también problemas potenciales y al ser producidas y consumidas en el mercado ilegal, los nombres con las que las reportan los consumidores pueden variar, usar el mismo nombre para referirse a sustancias diferentes, esto obliga a nueva tecnología de detección y a trabajo de investigación cuidadoso.

En México, según se desprende de los datos de decomisos hay una alta producción de metanfetaminas pero bajos índices de consumo, lo que sugiere que la producción se destina principalmente a mercados externos, sin embargo, una proporción se queda en el país y su uso está aumentando. Los resultados de encuestas sugieren una distribución diferencial del consumo a lo largo del país. Los estudiantes que terminan el bachillerato en la ciudad de México tienen un perfil diferente de los que entran a la universidad y una participación más reciente de las mujeres en el consumo de estas sustancias. No hay reportes consistentes de las nuevas drogas con potencial psicoactivo.

Estos antecedentes señalan la necesidad de:

- Un monitoreo continuo, con nuevas metodologías que permitan enfrentar los retos que este fenómeno representa.
- Profundizar en el estudio de la dinámica de los mercados y de los patrones de consumo.
- Hacer estudios de corte cualitativo que nos permitan entender la búsqueda de soluciones químicas inmediatas para modificar estados de ánimo, el uso para mejorar la imagen corporal.
- Conocer las razones para usar que permita desarrollar respuestas para prevenir, proteger y evitar daño, específicas para cada grupo.

## REFERENCIAS

- Chávez, J., J. Villatoro, L. Robles, M. Bustos, M. Moreno, N. Oliva, D. Fregoso, G. Gómez, M. E. Medina-Mora y A. Paredes, Encuesta Escolar sobre Adicciones en el Estado de Jalisco 2012. Consejo Estatal Contra las Adicciones de Jalisco, Instituto Nacional de Psiquiatría Ramón de la Fuente Muñiz (INPRFM) CD, México, 2013.
- Global Synthetic Drug Assessment. Amphetamine-type stimulants and new psychoactive substances, United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC), 2014.
- Martínez Arroyo, M. M., *Experiencia intersubjetiva del consumo de metanfetamina en usuarios de la ciudad de México y Ciudad Obregón, Sonora*, tesis para obtener el grado de doctor en Psicología, UNAM, México, 2015.
- Martínez Arroyo, M. M., J. Ricardo, M. E. Medina-Mora, M. Romero y S. Berenzon, “Los nuevos empresarios: Trayectoria del uso a la venta de drogas en contextos de fiesta”, *Salud Mental*, 35 (6), 2012: 475-481.
- Medina-Mora, M. E., J. A. Villatoro-Velázquez, C. Fleiz-Bautista, M. M. Téllez-Rojo, L. R. Mendoza-Alvarado, M. Romero-Martínez, J. P. Gutiérrez-Reyes, M. Castro-Tinoco, M. Hernández-Ávila, C. Tena-Tamayo, C. Alvear-Sevilla y V. Guisa-Cruz, Encuesta Nacional de Adicciones 2011, Instituto Nacional de Psiquiatría Ramón de la Fuente Muñiz (INPRFM) -Instituto Nacional de Salud Pública (INSP)-Secretaría de Salud (ss), México, 2012.
- National Institute on Drug Abuse (NIDA), “El Spice (marihuana sintética)”. Recuperado de <http://www.drugabuse.gov/es/publicaciones/drugfacts/el-spice-marihuana-sintetica>, consultado el 5 de octubre de 2015.
- National Institute on Drug Abuse (NIDA), “Los alucinógenos: LSD, peyote, psilocibina y PCP”. Recuperado de <http://www.drugabuse.gov/es/publicaciones/drugfacts/los-alucinogenos-lsd-peyote-psilocibina-y-pcp>, consultado el 5 de octubre de 2015b.
- National Institute on Drug Abuse (NIDA), “Methamphetamine”. Recuperado de <http://www.drugabuse.gov/publications/drugfacts/methamphetamine>, consultado el 5 de octubre de 2015c.
- National Institute on Drug Abuse (NIDA), “MDMA (Ecstasy or Molly)”. Recuperado de <http://www.drugabuse.gov/publications/drugfacts/mdma-ecstasy-or-molly> consultado el 5 de octubre de 2015d.
- Villatoro, J., M. E. Medina-Mora, C. Fleiz, M. Moreno, N. Oliva Robles, M. C. Bustos, D. Fregoso, M. L. Gutiérrez y N. Amador, “El consumo de drogas en México: Resultados de la Encuesta Nacional de Adicciones, 2011”, *Salud Mental*, 35 (6), 2012: 447-457.
- World Drug Report 2014 (United Nations Publication, Sales No. E. 14. XI. 7), United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC), 2014b.
- World Drug Report 2015 (United Nations Publication, Sales No. E. 15. XI. 6), United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC), 2015.
- [www.incb.org](http://www.incb.org), International Narcotics Control Board (INCB), 2015.

# La química. Un indicador de actividades del pasado

LINDA R. MANZANILLA NAIM

## INTRODUCCIÓN

Polvo de milenios... Los restos de sociedades pretéritas yacen bajo el polvo de milenios. Y toca al arqueólogo develar estas trazas, darle sentido a la basura, analizar residuos, seguir pistas al fin.

La arqueología tiene como objetivo el estudiar las poblaciones del pasado y sus transformaciones en el tiempo. Para este fin, está limitada a los restos materiales que las actividades de dichas poblaciones generan: instrumentos, desechos, materias primas, objetos semiprocesados, ecofactos (polen, fitolitos, microfósiles botánicos, restos de fauna) y compuestos químicos, además de restos óseos humanos. En particular, y a raíz de 40 años de trabajo arqueológico, destaco la importancia de los paquetes de información funcional que hemos denominado: “áreas de actividad” (véase figura 1), en las que estas diversas trazas materiales convergen, en espacios discretos donde un tipo de actividad ha sido repetida una y otra vez (Flannery [ed.], 1976; Manzanilla [ed.], 1986, 2007).

En los sitios arqueológicos podemos ver dos tipos de abandono:

1. Uno que hemos llamado “paulatino”, en el que la población se va yendo poco a poco; los factores que causan este abandono gradual son epidemias, merma en los recursos, transformaciones en las rutas de intercambio, movimientos mesiánicos, migraciones por cargas tributarias insostenibles, sequías o inundaciones catastróficas, etc. Los grupos humanos que migran pueden elegir qué objetos pueden llevar consigo dependiendo la distancia al lugar al que migran, los medios de transporte disponibles, el valor que le otorgan a dichos objetos, el gasto del reemplazo y las diversas necesidades que pueden satisfacer con ellos.
2. El segundo tipo es una deserción abrupta, y puede ser originada por erupciones volcánicas, sismicidad, aludes o deslizamientos de tierra o

lodo u otros fenómenos que originan desplazamientos súbitos de grupos humanos. En estos casos mucho queda en el sitio de origen, para beneficio de los arqueólogos que pueden analizar los restos de las últimas actividades que se llevaron a cabo sobre los pisos (Manzanilla, 2007).

Figura 1.  
ÁREAS DE ACTIVIDAD RITUALES DE OZTOYAHUALCO 15B:N6W3.



Manzanilla (ed.), 1993.

Insisto en la importancia de una perspectiva interdisciplinaria que permita al arqueólogo acopiar información de las ciencias exactas y naturales, para enmarcar científicamente la sociedad y el momento que estudia (Manzanilla, 2007). La química está presente en la arqueología en diversas fases de la investigación científica:

1. Los estudios geoquímicos de prospección que se conjuntan con información geofísica, topográfica, aerofotográfica, y de distribución de materiales arqueológicos en superficie para plantear una propuesta sobre lo que puede estar sepulto y que no vemos (Manzanilla [ed.], 1993; Manzanilla y Barba, 1994);

2. Los estudios químicos de los pisos excavados con el fin de añadir información al estudio de las áreas de actividad, particularmente en aquellos casos en que el sitio se abandonó paulatinamente (Manzanilla [ed.], 1993; Pecci *et al.*, 2010);
3. Las técnicas de difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y PIXE que ayudan a la caracterización de los materiales arqueológicos hallados por medio de técnicas sofisticadas (Martínez García *et al.*, 2012; Ruvalcaba Sil *et al.*, 2008);
4. Los análisis de trazas por activación neutrónica, para determinar yacimientos de origen de las arcillas, las rocas, los pigmentos y otros materiales utilizados por las sociedades pretéritas;
5. El estudio isotópico tanto de isótopos estables (Morales Puente *et al.*, 2012) como de isótopos de estroncio 87/86 (Price, Manzanilla y Middleton, 2000; Schaaf *et al.*, 2012) para determinar la procedencia de individuos hallados en el contexto arqueológico (Manzanilla, 2015);
6. El fechamiento por radiocarbono en el que se reduce a benceno la muestra que se meterá al contador de radiaciones (Beramendi Orosco *et al.*, 2009; Manzanilla [ed.], 2012).

## LAS SUPERFICIES DE OCUPACIÓN

El estudio de las superficies de ocupación ha sido abordado desde dos ópticas:

1. Cuando se trata de apisonados de lodo, la micromorfología de suelos (Courty *et al.*, 1989) comienza con cortes perpendiculares a la superficie ocupada que posteriormente se montan en láminas y se analizan al microscopio. Esta observación permite diferenciar las superficies que han sido caminadas constantemente y por lo tanto, presentan una compresión; aquéllas donde se concentraron animales domésticos en corrales y que son visibles por sus coprolitos; las que tuvieron encima esteras y cestos, y que dejaron los fitolitos de los pastos y juncos con los que se hicieron estos objetos; las que sirvieron para preparar comida y consumirla.
2. El segundo tipo de análisis es el estudio químico de los pisos de estuco que son tan comunes en Mesoamérica (Manzanilla y Barba, 1990 y 1994). Mi primer tesista doctoral, Luis Barba (2007) y su equipo, han sistematizado una serie de pruebas inorgánicas (fosfatos, carbonatos, pH) y orgánicas (residuos proteicos, ácidos grasos) que se conjuntan con los cambios de color del piso de estuco. Se parte de la premisa de que los líquidos orgánicos (caldos, por ejemplo) dejan anomalías de fosfa-

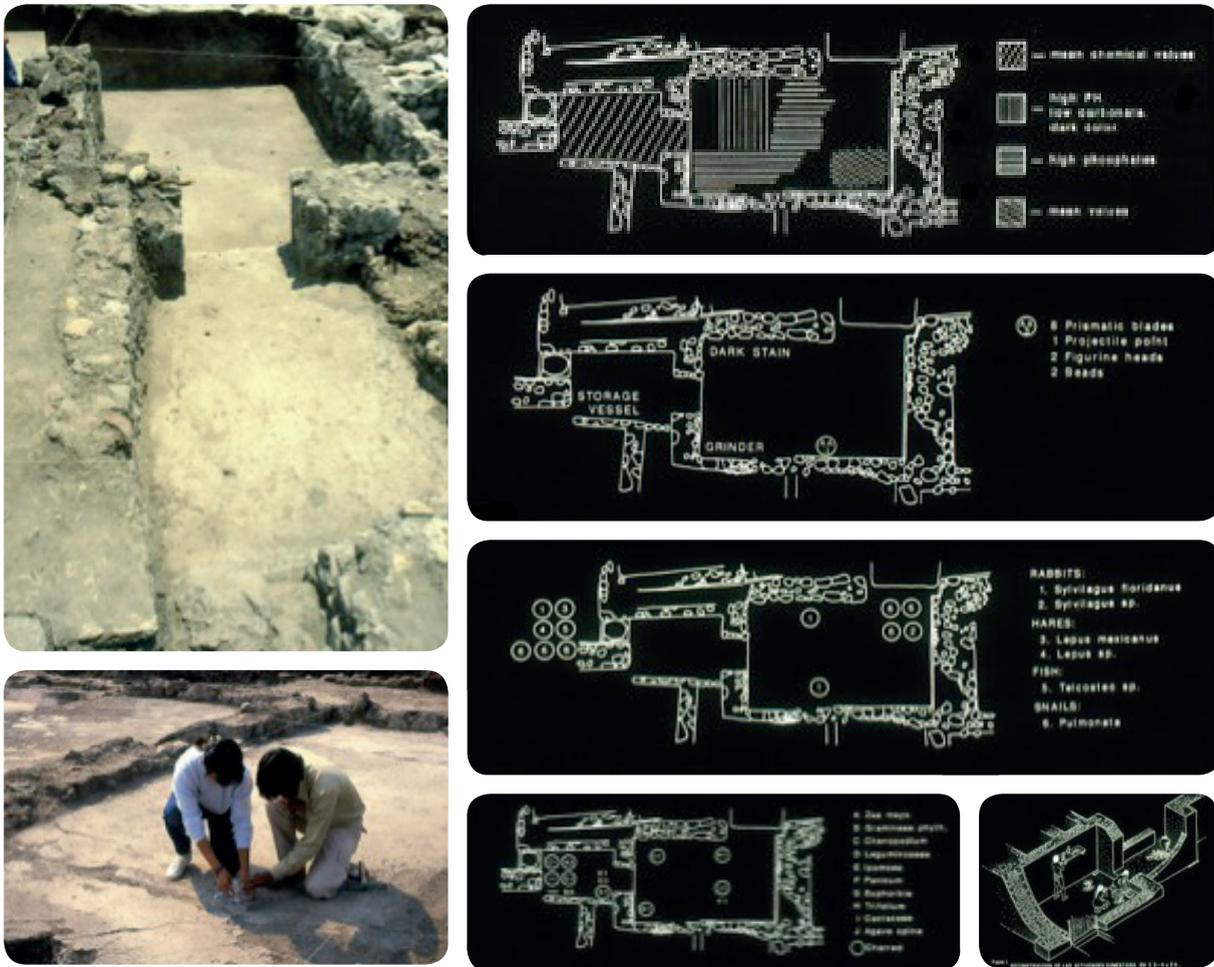
tos; las de carbonatos se producen por la preparación del nixtamal para la elaboración de tortillas con la adición de cal, o bien en la confección de estucos (carbonatos de calcio); las de pH se producen por concentraciones de cenizas; las de carbohidratos se originan en los azúcares de los agaves y del pulque, por ejemplo; los residuos proteicos se producen por la sangre, y los ácidos grasos pueden ser de origen vegetal o animal.

Gracias al estudio sistemático de áreas de actividad, en las que he introducido el estudio químico de pisos, hemos podido entender el uso de espacios domésticos en un conjunto multifamiliar y habitacional teotihuacano, en Oztoyahualco 15B:N6W3, en la periferia noroeste de la ciudad de Teotihuacan (Manzanilla [ed.], 1993, 1996 y 2009; Ortiz Butrón, 1990). En particular, el contraste entre cocinas y almacenes (véanse figuras 2 y 3) es notable, ya que el enriquecimiento químico se produce por la caída de líquidos en la preparación y consumo de comida, así como de cenizas donde yace el fogón o anafre; sin embargo, los almacenes están desprovistos de anomalías químicas ya que los bienes almacenados están en ánforas u otros contenedores. Los patios de servicio evidenciaron trayectorias de fosfatos hacia el drenaje, que podrían indicar la evacuación de orines y otros líquidos orgánicos. Los traspacios en los márgenes del conjunto multifamiliar no tuvieron pisos de estuco, y proporcionaron evidencias de actividades “sucias” como el des-tazamiento y la conservación de animales domésticos (perros, guajolotes y algunas variedades de conejos) (Manzanilla, 1996).

De este conjunto habitacional teotihuacano en Oztoyahualco 15B se estudiaron los patios rituales (Manzanilla, 1996; Barba, Ortiz y Manzanilla, 2007), y se pudo constatar el fuerte enriquecimiento de fosfatos y residuos proteicos alrededor de los altares móviles, e incluso la preparación del ritual en cuartos anexos a dichos patios (véase figura 4).

La estrategia de análisis químico de pisos estucados también se aplicó a mi proyecto “Teotihuacan. Elite y gobierno”, en el análisis de los sectores funcionales de un centro de barrio multiétnico de Teotihuacan: Teopancazco (Manzanilla [ed.], 2009, 2012 y 2015; Pecci *et al.*, 2010; Pecci, 2000; Ortiz Butrón, 2015). En este ejemplo (véanse figuras 6 y 7) hubieron resultados que corroboraron el uso de espacios para cocinas y almacenes, donde se preparó y almacenó comida para los trabajadores del centro de barrio (Manzanilla [ed.], 2012). Otros análisis permitieron entender el uso de la plaza ritual al acompañar a los sacerdotes del mural principal de Teopancazco, que caminan al altar y suben al templo principal en el costado oriental de la plaza, en los que reproducen rituales de siembra con líquidos orgánicos y semillas de chíá. Los líquidos orgánicos producen anomalías de fosfatos, y el caminar de los sacerdotes con las sandalias que usa la élite teotihuacana erosiona el carbonato de calcio del estuco y produce anomalías negativas de carbonatos.

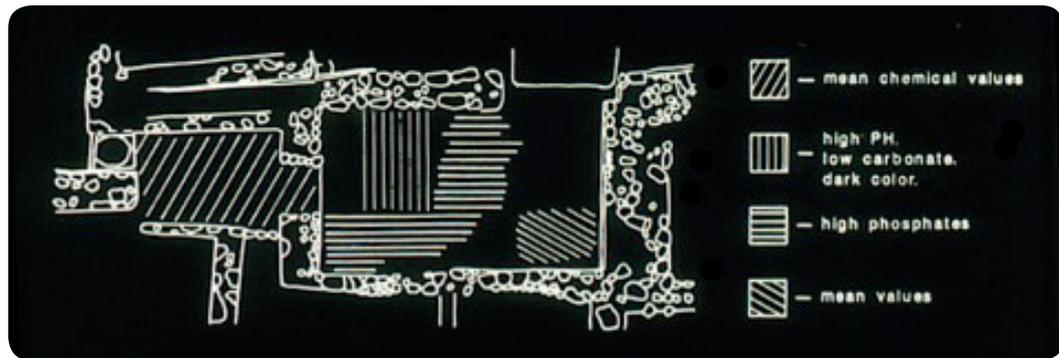
Figura 2.  
COCINAS Y ALMACENES DE OZTOYAHUALCO I 5B:N6W3.



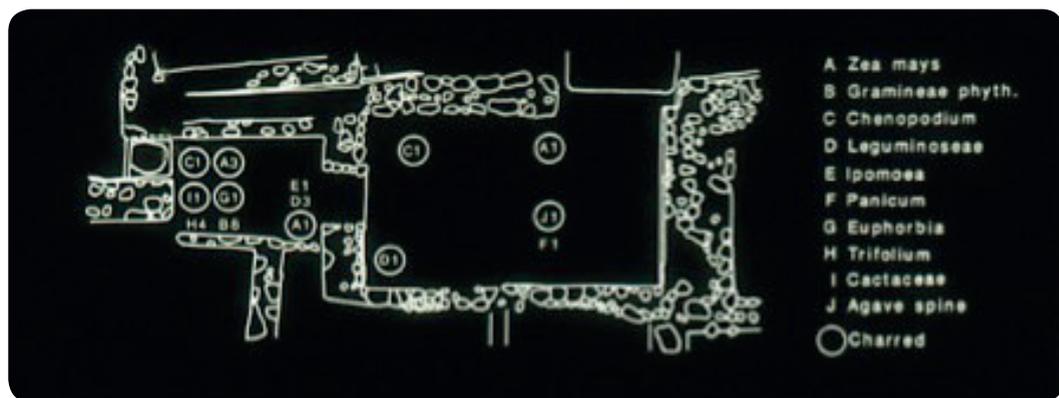
Manzanilla (ed.), 1993.

Figura 3.  
 OZTOYAHUALCO I 5B:N6W3, COCINA Y ALMACÉN.

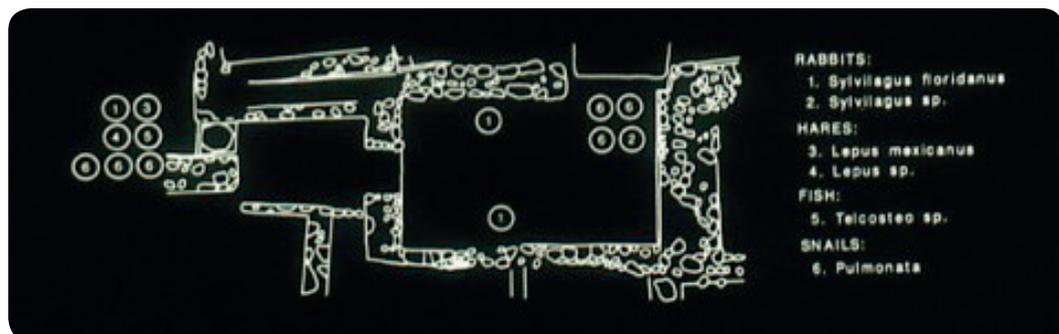
QUÍMICA



ARQUEOBOTÁNICA

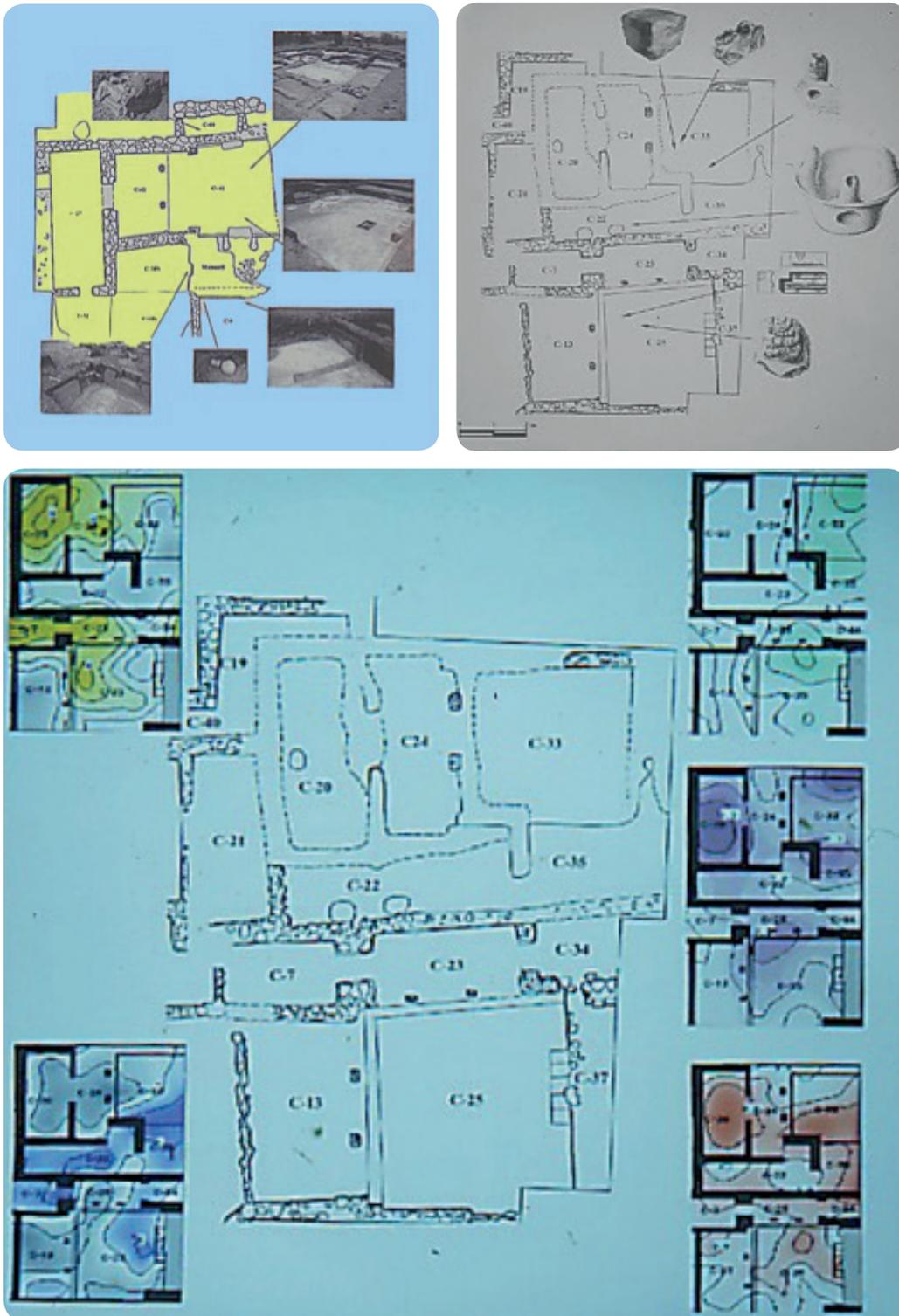


ARQUEOZOOLOGÍA



Manzanilla (ed.), 1993.

Figura 4.  
PATIOS RITUALES DE OZTOYAHUALCO, 15B: N6W3.



Barba, Ortiz y Manzanilla, 2007.

## ESTUDIOS DE PROCEDENCIA

Los estudios de procedencia, que se basan en la presencia de elementos traza que son específicos de un yacimiento particular, han sido utilizados con éxito para ver de dónde procede una arcilla, un tipo de obsidiana, un mineral particular. La activación neutrónica ha servido para relacionar tipos de cerámica con yacimientos de origen, gracias a bases de datos extensas, como las del acelerador de Missouri, en Estados Unidos.

Muchos de los materiales alóctonos de tipo suntuario que llegan a las ciudades mesoamericanas provienen de diversas regiones y es necesario especificar de dónde en particular. Este hecho permite entender las rutas de intercambio o apropiación de estos bienes que en muchos casos son utilizados por las élites (Manzanilla, 2015 y 2012). Pizarras, micas (véase figura 5), piedras verdes, jadeítas, pigmentos, cosméticos (véase figura 9), etc., llegan, por ejemplo, a Teotihuacan a través de caravanas de cargadores y artesanos que las eligen y procesan (Manzanilla, 2015; López Juárez *et al.*, 2012; Rosales de la Rosa y Manzanilla, 2011; Melgar Tísoc *et al.*, 2012; Martínez García *et al.*, 2012; Vázquez de Ágredos Pascual *et al.*, 2012; Doménech Carbó *et al.*, 2012; Barca *et al.*, 2013).

## LOS ANÁLISIS ISOTÓPICOS

Hasta hace poco, la migración a las grandes urbes era un fenómeno estudiado por los antropólogos pero inaccesible para los arqueólogos que trabajan con restos materiales y óseos. Sin embargo, los estudios isotópicos abrieron un nuevo paradigma en la integración interdisciplinaria. T. Douglas Price con los isótopos de estroncio 87/86 (véase figura 8) es un buen ejemplo (Price, Manzanilla y Middleton, 2000).

En general estos estudios se basan en el hecho de que la geología de un lugar determinado tiene una proporción isotópica de estroncio 87/86 particular, que pasa a los suelos, luego a las plantas, a los herbívoros, los carnívoros y omnívoros. Asimismo, el agua de lluvia a una altitud determinada tiene una proporción particular de isótopos de oxígeno. Una persona cuya infancia transcurre en un lugar determinado incorpora esas proporciones en sus dientes y la información queda sellada; si migra a otro lugar, en sus huesos veremos la proporción del lugar nuevo, ya que hay un recambio de tejidos. Cuando los arqueólogos hallamos restos óseos *in situ* podemos contrastar las proporciones de dientes y huesos, y si no corresponden, se trata de migrantes (Manzanilla, 2015; Schaaf *et al.*, 2012; Morales Puente *et al.*, 2012; Price, Manzanilla y Middleton, 2000).

Por otra parte, también se pueden analizar elementos traza en los huesos, que podrían ilustrarnos, una vez eliminadas las variables tafonómicas de contaminación

por los sedimentos donde yace el hueso, sobre la dieta de los individuos (Mejía Appel, 2011). Asimismo, los isótopos de nitrógeno pueden ilustrarnos sobre los niveles tróficos de esos individuos sepultos (Morales Puente *et al.*, 2012).

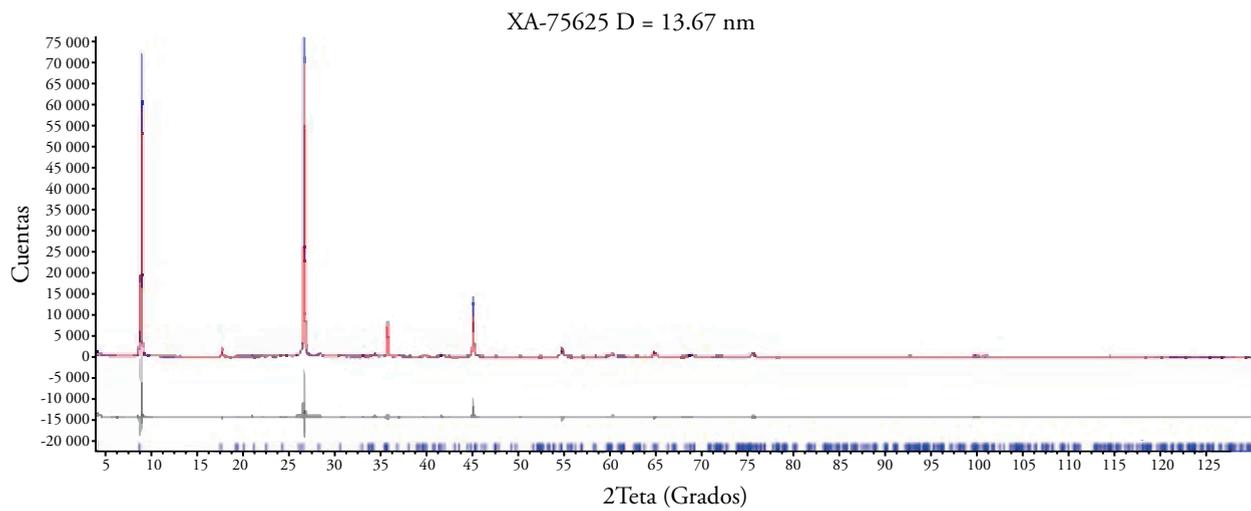
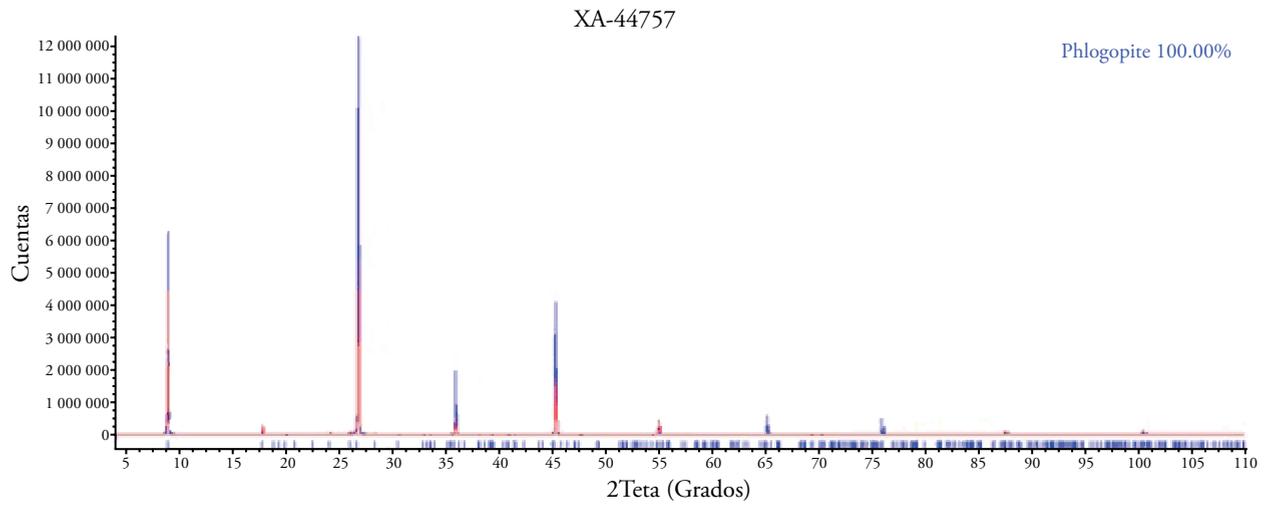
#### LOS FECHAMIENTOS DE RADIOCARBONO

Sin duda, el fechamiento de los contextos arqueológicos es una de nuestras prioridades, ya que debemos establecer qué pasó en cada espacio, y posteriormente determinar las transformaciones de las sociedades a través del tiempo (Manzanilla [ed.], 2012; Manzanilla y Barba, 1994). Por lo tanto, una de las herramientas más importantes es el fechamiento de materiales orgánicos por radiocarbono (Beramendi Orosco *et al.*, 2009), y su posterior contrastación con otras técnicas de fechamiento como el arqueomagnetismo (Soler Arechalde *et al.*, 2006), la termoluminiscencia, la hidratación de obsidiana (Manzanilla, López y Freter, 1996), y otras.

#### COMENTARIOS FINALES

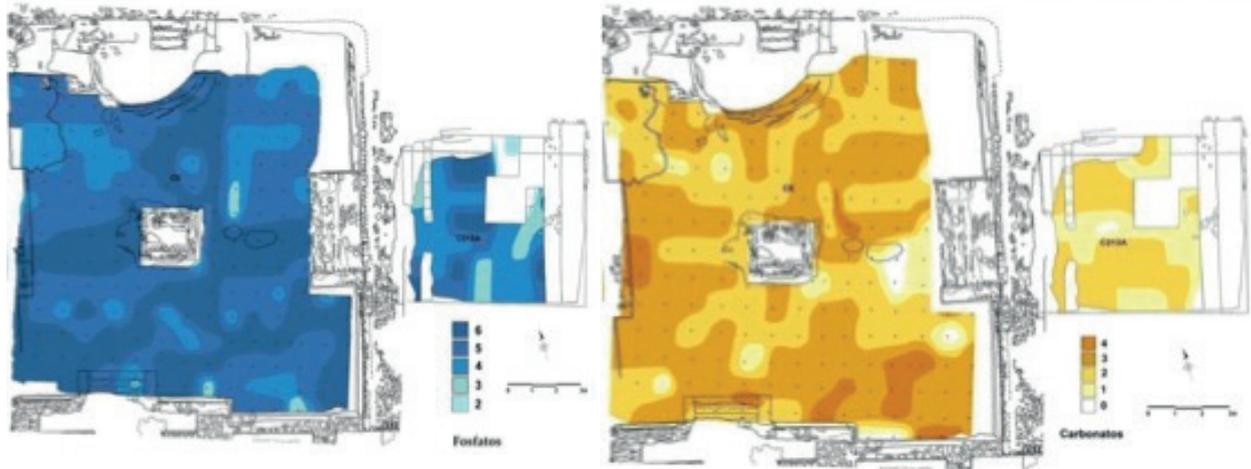
Sin duda alguna, hay muchos más aspectos en que la química proporciona información valiosa a los arqueólogos. He delineado los aspectos esenciales, mismos que forman parte de una estrategia interdisciplinaria para armar un magno rompecabezas sobre las actividades del pasado. La biología nos ayuda a identificar las plantas y animales que fueron consumidos o utilizados por dichas sociedades preteritas, o bien, que formaron parte del ambiente alrededor de los sitios arqueológicos (Manzanilla [ed.], 2009 y 1993). La física es importante para las técnicas de fechamiento (Beramendi Orosco *et al.*, 2009), la determinación de procedencias, o las características ópticas de los minerales. La geología proporciona información sobre rocas y minerales accesibles a los grupos humanos del pasado, y la geomorfología nos ayuda a entender la ubicación de los sitios y los recursos disponibles, sobre todo agua y tierras agrícolas. La osteología humana permite el sexamiento, la determinación de edad y paleopatologías, además de marcas de actividad y prácticas culturales, en los esqueletos humanos (Manzanilla, 2015). La genética nos habla de los grupos genéticos presentes en una población preterita (Álvarez-Sandoval *et al.*, 2015). Todo esto se correlaciona con los instrumentos, desechos, objetos y materias primas que los arqueólogos estudiamos, y la integración resultante ofrece un panorama complejo de interacciones, jerarquías y cambios (Manzanilla [ed.], 2012 y 1993).

Figura 5.  
ESTUDIO DE MICAS CON DIFRACCIÓN DE RAYOS X.



Bokhimi y Manzanilla, 2014.

Figura 6.  
TEOPANCAZCO,  
QUÍMICA DE PISOS DE ESTUCO.



Alessandra Pecci, Agustín Ortiz y Juan R. Hernández.

Figura 7.  
ESTUDIO QUÍMICO DE COCINAS Y ALMACENES DE TEOPANCAZCO.



FOSFATOS



CARBONATOS



pH



RESIDUOS PROTÉICOS



Pecci, Ortiz, Barba y Manzanilla, 2010.



Figura 8.  
ISÓTOPOS DE ESTRONCIO 87/86 PARA DETECTAR MIGRANTES.



**STRONTIUM ISOTOPES**

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

1. Measured in thermal ionization (solid source) mass spectrometer
2.  $^{87}\text{Rb} \longrightarrow > > ^{87}\text{Sr}$
3.  $^{86}\text{Sr}$  is stable

**OZTOYAHUALCO 15B BURIALS: Sr 87/86 (Price, Manzanilla and Middleton 2000)**

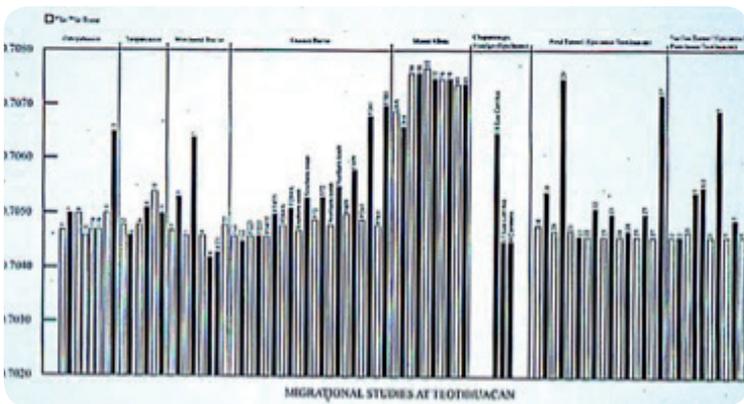
| Burial no. | Location | Tooth     | Bone      | Migratory Status |
|------------|----------|-----------|-----------|------------------|
| No. 8      | C21      | -----     | 0.705071  |                  |
| No. 10     | C19 F11  | -----     | 0.704672  |                  |
| No. 11a    | C22 F29  | -----     | 0.704759  |                  |
| No. 11b    | C22 F29  | -----     | 0.704736  |                  |
| No. 13     | C10 AA26 | 0.706504  | 0.705061  | Migrant          |
| No. 7      |          | 0.7050895 | 0.7047958 | Migrant          |

**TEOPANCAZCO BURIALS: Sr 87/86 (Schaaf and Manzanilla)**

| Burial no.      | Location                 | Tooth    | Bone     | Migratory status |
|-----------------|--------------------------|----------|----------|------------------|
| No. 2           | C23                      | 0.704625 | 0.704723 | Local            |
| No. 3           | C24 AA18                 | 0.704772 | 0.704672 | Local?           |
| No. 4           | C19 AA27                 | -----    | 0.704736 | Local            |
| No. 5           | C54 AA39                 | 0.706682 | 0.704769 | Migrant          |
| No. 6           | C6                       | 0.705162 | 0.704700 | Migrant          |
| No. 7           | C53 AA44                 | 0.704907 | 0.704777 | Local?           |
| No. 8           | C6                       | 0.704748 | 0.704742 | Local            |
| No. 9           | C61 AA54                 | 0.705560 | 0.704874 | Migrant          |
| No. 15          | C251A AA66 Tailor's shop | 0.705262 | 0.704804 | Migrant          |
| No. 17          | C151 AA65 Tailor's shop  | 0.705078 | 0.704856 | Migrant          |
| No. 55          | C162F AA144 Decapitated  | 0.704692 | 0.705134 | Migrant          |
| No. 70          | C162F AA144 Decapitated  | 0.704598 | 0.705188 | Migrant          |
| No. 36 (Manapa) | C507C AA118              | 0.704992 | 0.704560 | Migrant          |

**MERCHANTS' BARRIO BURIALS (Rattray; Price, Manzanilla and Middleton 2000)**

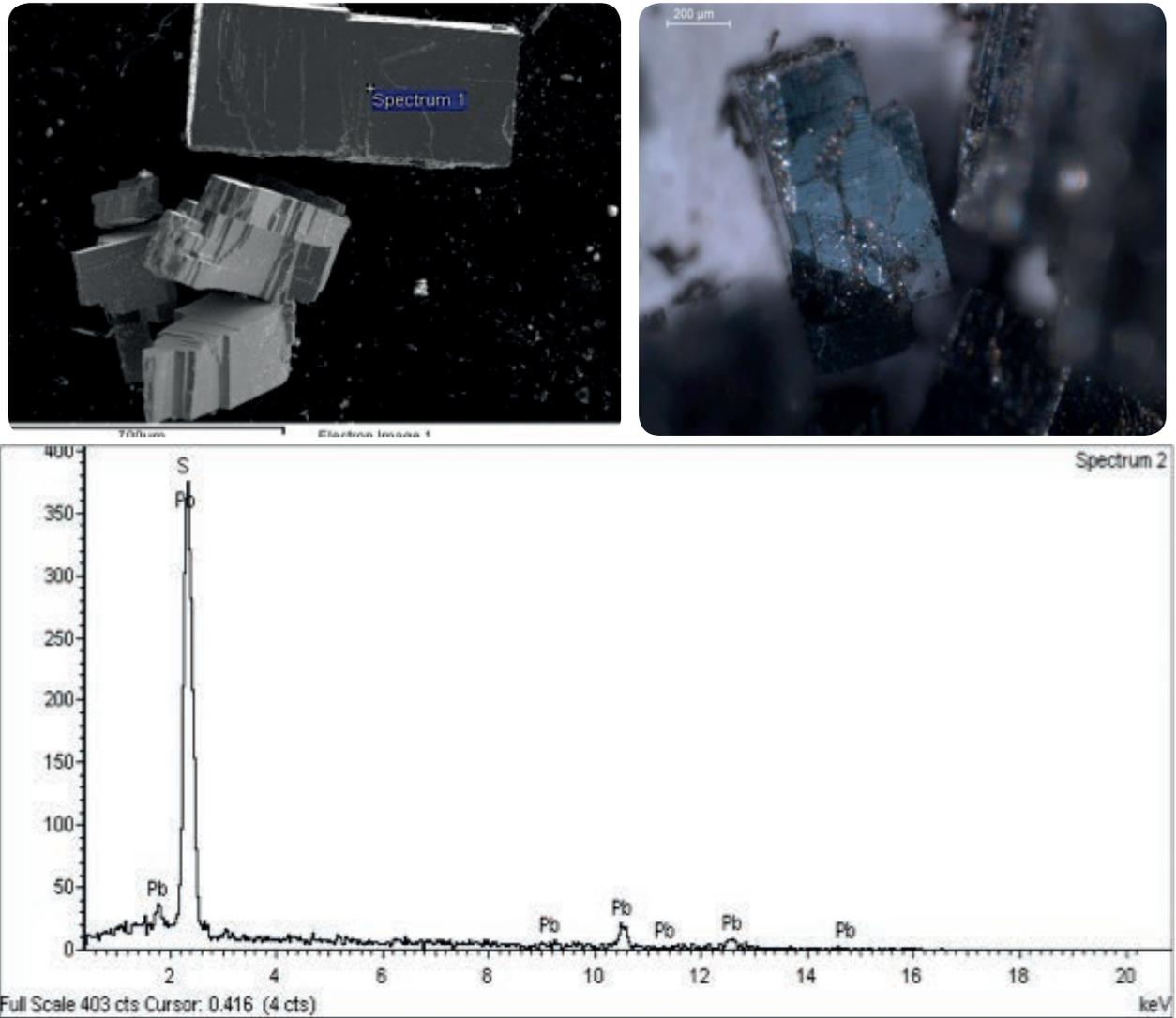
| Burial no. | Location          | Tooth     | Bone      | Migratory Status |
|------------|-------------------|-----------|-----------|------------------|
| No. 4      | 3E:N384 E1N5-E2N5 | 0.704223  | 0.70466   | Migrant          |
| No. 22     | 12:N384 W153      | -----     | 0.704826  |                  |
| No. 4.12   | 3E:N384 E1N5-E2N5 | 0.704302  | -----     | Migrant          |
| 7          |                   | 0.7053876 | 0.7047584 | Migrant          |
| 77         |                   | 0.7064574 | 0.704658  | Migrant          |



Price, Manzanilla y Middleton, 2000.



Figura 9.  
MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO/MICROANÁLISIS DE RAYOS X (SEM/EDX).



Vázquez de Ágredos *et al.*, 2012.

## REFERENCIAS

- Álvarez-Sandoval, B., L. R. Manzanilla, M. González-Ruiz M., A. Malgosa y R. Montiel, “Genetic evidence supports the multiethnic character of Teopancazco, a neighborhood center of Teotihuacan, Mexico (AD 200-600)”, *Plos-One*, doi:101371/journal.pone.0132371, 22 de julio de 2015: 1-19.
- Barba, L., “Chemical Residues in Lime-Plastered Archaeological Floors”, *Geoarchaeology: An International Journal*, 22 (4), 2007: 439-452
- Barba, L., A. Ortiz y L. R. Manzanilla, “Commoner ritual at Teotihuacan, Central Mexico. Methodological considerations”, en *Commoner ritual, and ideology in Ancient Mesoamerica*, ed. de N. Gonlin y J. Lohse, University Press of Colorado, Boulder, 2007, pp. 55-82.
- Barca, D., D. Miriello, A. Pecci, L. Barba, A. Ortiz, L. R. Manzanilla, J. Blancas y G. M. Crisci, “Provenance of glass shards in archaeological lime plasters by LA-ICP-MS: Implications for the ancient routes from the Gulf Coast of Mexico to Teotihuacan in Central Mexico”, *Journal of Archaeological Science*, 40, 2013: 3999-4008.
- Beramendi Orosco, L. E., G. González Hernández, J. Urrutia Fucugauchi, L. R. Manzanilla, A. M. Soler Arechalde, A. Goguitchaishvili y N. Jarboe, “High-resolution chronology for the Mesoamerican urban center of Teotihuacan derived from Bayesian statistics of radiocarbon and archaeological data”, *Quaternary Research*, 71, 2009: 99-107
- Courty, M. A., P. Goldberg y R. MacPhail, *Soils and Micromorphology in Archaeology*, Cambridge Manuals in Archaeology, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
- Doménech Carbó, M. T., M. L. Vázquez de Ágredos Pascual, L. Osete Cortina, A. Doménech Carbó, N. Guasch Ferré, L. R. Manzanilla y C. Vidal Lorenzo, “Characterization of prehispanic cosmetics found in a burial of the ancient city of Teotihuacan (Mexico)”, *Journal of Archaeological Science*, 39, 2012: 1043-1062.
- Flannery, K. V. (ed.), *The Early Mesoamerican Village*, Academic Press, Nueva York, 1976.
- López Juárez, J. M., J. Luis Ruvalcaba Sil y M. Aguilar Franco, “VI. Aplicación de difracción de rayos X (XRD), rayos X y luminiscencia inducidas por protones (PIXE e IOL) para la caracterización de pizarra de Teotihuacan”, en L. R. Manzanilla (ed.), *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopancazco en Teotihuacan*, Coordinación de Humanidades-Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México, 2012, pp. 233-256.
- Manzanilla, L. (ed.), “Introducción”, en *Unidades habitacionales mesoamericanas y sus áreas de actividad*, IIA, UNAM, México, 1986, pp. 9-18.
- Manzanilla, L. (ed.), *Anatomía de un conjunto residencial teotihuacano en Oztoyahualco*, IIA, UNAM, México, 1993.
- Manzanilla, L., “Corporate groups and domestic activities at Teotihuacan”, *Latin American Antiquity*, 7 (3), 1996: 228-246.
- Manzanilla, L. R. “La unidad doméstica y las unidades de producción. Propuesta interdisciplinaria de estudio”, en *Memoria 2007*, El Colegio Nacional, México, 2007, pp. 415-451.
- Manzanilla, L. R. y C. Chapdelaine (eds.), “Corporate life in apartment and *barrio* compounds at Teotihuacan, Central Mexico: craft specialization, hierarchy and ethnicity”, en *Domestic Life in Prehispanic Capitals. A Study of Specialization, Hierarchy and Ethnicity*, Memoirs of the Museum of Anthropology no. 46, Studies in Latin American Ethnohistory and Archaeology, University of Michigan, Ann Arbor, vol. VII, 2009, pp. 21-42.
- Manzanilla, L. R. (ed.). *Obras 1. El inframundo de Teotihuacan. Ocupaciones post-teotihuacanas en los túneles al este de la Pirámide del Sol. Volumen II. El ambiente y el hombre. Arqueofauna*, El Colegio Nacional, México, 2009.

- Manzanilla, L. R. (ed.), "Introducción. Teopancazco, un centro de barrio multiétnico de Teotihuacan", en *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopancazco en Teotihuacan*, Coordinación de la Investigación Científica-Coordinación de Humanidades, UNAM, México, 2012, pp. 1-50.
- Manzanilla, L. R. (ed.), *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopancazco en Teotihuacan*, Coordinación de Humanidades-Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México, 2012.
- Manzanilla, L. R. "Cooperation and tensions in multiethnic corporate societies using Teotihuacan, Central Mexico, as a case study", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (30), 2015: 9210-9215.
- Manzanilla, L. y L. Barba, "The study of activities in classic households. Two case studies from Cobá and Teotihuacan", *Ancient Mesoamerica*, 1, 1990: 41-49.
- Manzanilla, L. y L. Barba, *La arqueología. Una visión científica del pasado del hombre*, FCE, México, 1994, Colec. La Ciencia desde México, núm. 123.
- Manzanilla, L. R., C. López y A. C. Freter, "Dating results from excavations in quarry tunnels behind the pyramid of the sun at Teotihuacan", *Ancient Mesoamerica*, 7, 1996: 245-266.
- Martínez García, C. C., J. L. Ruvalcaba Sil, L. R. Manzanilla Naim y F. Riquelme, "IV. Teopancazco y su pintura. Aplicación de técnicas analíticas PIXE, MEB-EDX, DRX, FTIR y Raman", en L. R. Manzanilla (ed.), *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopancazco en Teotihuacan*, Coordinación de Humanidades-Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México, 2012, pp. 165-210.
- Mejía Appel, G. I., "De pescado los tamales. Patrones de consumo alimenticio en un centro de barrio de Teotihuacan", *Estudios de Antropología Biológica*, XV, 2011: 13-27.
- Melgar Tísoc, E. R., R. B. Solís Ciriaco y J. L. Ruvalcaba Sil, "VII. La lapidaria de Teopancazco: composición y manufactura", en L. R. Manzanilla (ed.), *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopancazco en Teotihuacan*, Coordinación de Humanidades-Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México, 2012, pp. 257-284.
- Morales Puente, P., E. Cienfuegos Alvarado, L. R. Manzanilla Naim y F. J. Otero Trujano, "XI. Estudio de la paleodieta empleando isótopos estables de los elementos carbono, oxígeno y nitrógeno en restos humanos y de fauna encontrados en el barrio teotihuacano de Teopancazco", en L. R. Manzanilla (ed.), *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopancazco en Teotihuacan*, Coordinación de Humanidades-Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México, 2012, pp. 347-423.
- Ortiz Butrón, A., *Oztoyahualco: Estudio químico de los pisos de un conjunto residencial Teotihuacano*, tesis de licenciatura, ENAH, México, 1990.
- Ortiz Butrón, A., *Determinación de las características de un barrio teotihuacano con arqueometría. El caso de Teopancazco*, tesis de doctorado en Antropología, FFYL, UNAM, México, 2015.
- Pecci, A., *Análisis químico de pisos y áreas de actividad. Estudio de caso en Teopancazco, Teotihuacan*, tesis de maestría en Antropología (Arqueología). FFYL, UNAM, México, 2000.
- Pecci, A., A. Ortiz, L. Barba y L. R. Manzanilla, "Distribución espacial de las actividades humanas con base en el análisis químico de los pisos de Teopancazco, Teotihuacan", en E. Ortiz Díaz (ed.), *VI Coloquio Bosch Gimpera. Lugar, Espacio y Paisaje en Arqueología: Mesoamérica y otras áreas culturales*, IIA, UNAM, 2010: 447-472.
- Price, T. D., L. Manzanilla y W. H. Middleton, "Immigration and the Ancient City of Teotihuacan in Mexico: a Study using Strontium Isotope Ratios in Human Bone and Teeth", *Journal of Archaeological Science*, 27, 2000: 903-913.

- Rosales de la Rosa, E. y L. R. Manzanilla, “Producción, consumo y distribución de la mica en Teotihuacan. Presencia de un recurso alóctono en los contextos arqueológicos de dos conjuntos arquitectónicos: Xalla y Teopancazco”, en L. R. Manzanilla y K. Hirth (eds.), *La producción artesanal y especializada en Mesoamérica. Áreas de actividad y procesos productivos*, INAH-UNAM, México, 2011, pp. 131-152.
- Ruvalcaba Sil, J. L., L. Manzanilla, E. Melgar y R. Lozano Santa Cruz, “PIXE and ionoluminescence for Mesoamerican jadeite characterization”, *X-Ray Spectrometry*, 37, 2008: 96-99.
- Schaaf, P., G. Solís, L. R. Manzanilla, T. Hernández, B. Lailson y P. Horn, “XII. Isótopos de estroncio aplicados a estudios de migración humana en el centro de barrio de Teopancazco, Teotihuacan”, en L. R. Manzanilla (ed.), *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopancazco en Teotihuacan*, Coordinación de Humanidades-Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México, 2012, pp. 423-448.
- Soler Arechalde, A. M., F. Sánchez, M. Rodríguez, M. Caballero Miranda, A. Gogutchashvili, J. Urrutia Fucugauchi, L. Manzanilla y D. Tarling, “Archaeomagnetic investigations of oriented pre-Columbian lime plasters from Teotihuacan, Mesoamerica”, *Earth, Planets and Space*, 58 (10), 2006: 1433-1439.
- Vázquez de Ágredos Pascual, M. L., L. R. Manzanilla Naim y C. Vidal Lorenzo, “V. Antiguas esencias aromáticas y cosméticos funerarios del barrio multiétnico de Teopancazco (Teotihuacan, Mexico)”, en L. R. Manzanilla (ed.), *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopancazco en Teotihuacan*, Coordinación de Humanidades-Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, México, 2012, pp. 211-232.



## ¿Músico o químico? Alexander Borodin (1833-1887)

ADOLFO MARTÍNEZ PALOMO

Uno de los inconvenientes para la resolución de los grandes problemas mundiales es la falta de comunicación entre las dos culturas: la ciencia y el arte, según la interminable discusión iniciada por Charles Percy Snow en 1959. Sabemos que Snow no logró la fusión de las dos culturas, porque su experiencia como químico terminó en fracaso y, en cambio, su labor como escritor le valió reconocimiento. Desde entonces se han buscado, con poco éxito, ejemplos de profesionales que destaquen por igual, como científicos y artistas. Sin duda uno de los escasos ejemplos, si no es que el único conocido de hombre exitoso tanto como investigador científico, como compositor de música clásica, es Alexander Borodin. ¿Habrá logrado nuestro personaje la fusión de las dos culturas al realizar en paralelo las dos actividades profesionales? Juzguemos a partir de la historia.

Borodin nació en San Petersburgo en 1833. Su padre fue el príncipe Luka Stepanovich Gedianov, pero Alexander nunca llevó su nombre; al ser hijo ilegítimo, el apellido Borodin lo recibió de un sirviente del príncipe, por lo que a su nacimiento pasó a ser siervo de su propio padre. Hacia los diez años de edad el príncipe, en su lecho de muerte, lo liberó de la condición de siervo. A pesar de no haber tenido el reconocimiento de su origen como hijo de príncipe, la educación inicial de Alexander fue esmerada,



Figura 1.

LA FALTA DE COMUNICACIÓN ENTRE LAS CIENCIAS Y LAS HUMANIDADES ES UNO DE LOS GRANDES INCONVENIENTES PARA LA SOLUCIÓN DE LOS PROBLEMAS MUNDIALES.

CH. P. SNOW, 1959.

Figura 2.  
ALEXANDER BORODIN.



gracias a los empeños de su madre Avdotia Konstantinovna Antonova. La “tía Mimi”, como tenía que decirle su hijo frente a extraños, contrató maestros a domicilio para completar su enseñanza primaria y estuvo siempre atenta a su desarrollo académico ulterior.

Desde los ocho años Alexander mostró interés y predisposición por la música, afición que su madre cultivó ofreciéndole cursos particulares de flauta, y él incrementó tocando el piano y más tarde el violonchelo. A los 14 años ya había escrito un concierto para flauta y piano, a pesar de no tener formación como compositor. Los intereses del adolescente Borodin no se limitaban a la música: las ciencias naturales y, en particular, la química despertaron en él una gran pasión, al grado que su apartamento estaba lleno de matraces, retortas y toda clase de productos químicos, que daban un intenso y desagradable olor a las habitaciones. Además, su memoria excepcional le permitió dominar pronto varios idiomas: alemán, francés, inglés e italiano.

A los 17 años, su madre logró reunir dinero suficiente para registrar “al siervo emancipado del Príncipe Gedianov” en la Academia Médico-Quirúrgica de San Petersburgo, institución en la que entró el año siguiente después de pasar con éxito los exámenes de ingreso. Para facilitar los traslados a la escuela del querido hijo, su madre consiguió alojamiento muy cerca de la Academia.

En los inicios, los brillantes principios de Alexander como estudiante de medicina se vieron amenazados por una grave infección que contrajo al contacto con un cadáver en el que estudiaba anatomía. Pronto su interés se centró más en la química que en la materias médicas, al grado que en el tercer año convenció al famoso profesor Zinin de permitirle trabajar en su laboratorio de química. Durante sus estudios profesionales, las dos pasiones de Borodin —el arte y la ciencia— lo ocupaban por igual: mientras trabajaba en el laboratorio de química pasaba el tiempo tarareando música, al grado que Zinin le dijo en varias ocasiones:

Señor Borodin, concéntrese menos en su música. Tengo intenciones de nombrarlo mi sucesor, pero usted sólo piensa en sus melodías; no se pueden capturar dos presas al mismo tiempo.

Mientras tanto, sus materias médicas progresaban con éxito, aunque resultaba evidente que él no se sentía atraído por una carrera rodeado de enfermos. De hecho, en una ocasión se desmayó tres veces ante la vista de la sangre y las heridas de siervos que eran brutalmente golpeados por sus amos, al grado de dejar expuestos los huesos.

Al final de sus estudios, y después de numerosos exámenes, la Academia le autorizó iniciar su tesis doctoral como médico con un tema que poco tenía que ver con la salud: “Sobre la analogía química y toxicológica del ácido arsénico con el

ácido fosfórico”. Su tesis fue la primera aceptada por la Academia en idioma ruso, ya que las anteriores tenían que ser escritas en latín.

Ya como maestro, Borodin se caracterizó por su dedicación absoluta a los alumnos, con quienes compartía con frecuencia comidas, cenas y alojamiento, y por el interés —inusual para esa época— por promover la educación de las mujeres en la escuela médica, en contra de la reacción oficial de los círculos del poder zarista, que desconfiaban de los supuestos peligros de ofrecer educación superior a las mujeres; así, con su apoyo, se establecieron cursos para mujeres médicas por vez primera en Rusia y en muchos otros países europeos. De hecho, el ingreso de las mujeres a la carrera médica no ocurrió sino hasta 1872, cuando fue indispensable contar con ellas para contender una epidemia que diezmaba la población infantil del país.

A pesar de sus abundantes ocupaciones científicas, nuestro personaje no dejaba de lado la música: asistía a numerosos conciertos, tocaba el piano, componía. Hasta entonces Borodin consideraba la actividad musical sólo como un pasatiempo. Por esa época inició su relación con el que llegaría a ser su gran amigo: Modest Mussorgsky, entonces un oficial del ejército zarista, quien expresaba interés por dedicarse de lleno a la composición y quien, al cabo de los años, terminaría su vida en brazos de Alexander, consumido por la cirrosis alcohólica.

Una vez obtenido el título de doctor en medicina, se decidió a abrazar la carrera de químico y viajó tres años al extranjero con una beca especial de la Academia Médico-Quirúrgica. En Alemania hizo amistad con otros químicos rusos quienes, encabezados por Dmitri Mendeléyev —el padre de la tabla periódica de los elementos— crearon el llamado “círculo ruso de Heidelberg”. En ese viaje Borodin conoció a una pianista talentosa: Ekaterina Sergeyevna Protopopova. Ella lo introdujo a la música de Chopin, Schumann y Liszt. Pronto iniciaron una relación que concluyó en matrimonio; a pesar de estar enferma de tuberculosis, Ekaterina llegó a sobrevivir a su esposo.

En tanto profundizaba en sus estudios sobre los derivados de la bencidina, de gran interés teórico y práctico por su relación con la producción de colorantes orgánicos, Alexander continuaba con interpretaciones y composiciones de música de cámara. En alguna ocasión describió la rutina diaria de permanecer en el laboratorio de química desde las cinco de la mañana hasta las cinco de la tarde. Años después mencionó hábitos de acostarse hacia las dos de la madrugada para levantarse a trabajar dos o tres horas después.

Los estudios químicos de Borodin eran notablemente complicados, como los de la fluorinación de compuestos orgánicos, complejos no sólo desde el punto de vista teórico, sino por los requerimientos de material costoso y por el hecho que los reactivos con los que trabajaba eran potencialmente explosivos.

De hecho, uno de sus estudiantes, Nikolai Kibalchich, realizó el primer desarrollo teórico de un cohete que pudiera superar la atmósfera de la Tierra, por lo

Figura 3.  
MODEST MUSSORGSKY.



que un cráter de la Luna lleva su nombre. Ese mismo alumno de Borodin pasó además a la historia por otro acontecimiento relacionado con explosivos; en este caso, una bomba dirigida certeramente al zar Alejandro II, que acabó con la vida de éste. El químico responsable de la explosión fue juzgado culpable y murió en la horca.

A su regreso a San Petersburgo se otorgó a Borodin el título de maestro y algo más: un apartamento, adjunto a su laboratorio de química, en el edificio del Instituto de Historia de Ciencia Natural, en el que se instaló con su esposa.

Borodin por esa época fue descrito así:

Era una persona deliciosa, seductora, dotado generosamente por la naturaleza. Todo lo que iniciaba resultaba exitoso; era sencillo y amable, como si fuera en realidad una persona común y corriente.

Su dedicación en el laboratorio lo llevó además al descubrimiento de un método para analizar el contenido de urea en muestras clínicas y otro para compuestos que imparten sabor de manzana a productos de repostería. Entre sus mayores éxitos se cuenta la definición clásica de una reacción química llamada condensación de aldoles, que ha tenido y sigue teniendo numerosas aplicaciones en la práctica. Por ejemplo, la ruta que inicialmente empleó la empresa Pfizer para sintetizar el fármaco anticolesterolémico *Lipitor* (atorvastatina), aprobado en 1996, empleaba dos reacciones aldólicas, que permitieron la producción en gran escala del fármaco.

Además de su pasión por la química, Borodin formaba parte de un grupo activo de intelectuales progresistas que se oponían con firmeza a las tendencias reaccionarias del régimen zarista, manifestadas entre otras acciones por la oposición al ingreso en la Academia de Ciencias del famoso químico Mendeléyev.

En uno de sus viajes a Alemania, Borodin conoció a Franz Liszt, con quien desarrolló una relación afectiva cercana, por el apoyo que el músico le dio a su obra y la dedicación de Liszt para promover la interpretación de varias composiciones de Alexander, en particular su segunda sinfonía y el poema sinfónico *En las estepas del Asia Central*. Al conocer a Liszt le dijo Borodin: “Maestro, yo sólo soy un compositor de domingo”. A lo que replicó Liszt: “Sí, por eso los domingos son días de fiesta”.

Hacia el final de su vida, Alexander empezó a interesarse en la creación de una ópera *El príncipe Ígor* para la cual estudió con ahínco la vida de los pueblos antiguos de Rusia. Sin embargo, la química le robaba su tiempo y sólo disponía de espacio para componer cuando se enfermaba. Escuchemos lo que él mismo dijo sobre este asunto:

Cuando estoy enfermo me quedo en casa, no puedo hacer nada en forma eficiente, mi cabeza se parte, mis ojos lloran; cuando tengo que buscar un pañuelo en mi bolsa... ¡es cuando escribo música! La enfermedad es la que permite que aparezcan de vez en cuando nuevos cimientos del edificio de mi nueva ópera.

Figura 4.  
DISEÑO DE VESTUARIO PARA *EL PRÍNCIPE ÍGOR*.



Y sobre esto mismo escribió a un amigo:

Como solamente escribo música estando enfermo, por favor en vez de decirme “que te mejores” díganme “espero que sigas enfermo”.

Según su biografía rusa Nina Berberova:

Escribía mucho, en buena medida porque con frecuencia se encontraba indispuesto. Por poco que una indigestión, una angina o un simple catarro le retuviera en casa, encontraba el tiempo para componer. Como no estaba acostumbrado a escribir notas, su escritura musical no estaba formada: llenaba cuidadosamente, con pulcritud, hojas de papel pautado, que eran más tarde corregidas por Balakirev o Korsakov. Permanecía sentado al piano con una compresa alrededor del cuello, tosiendo y sonándose la nariz cada minuto.

Sobre su relación con sus compañeros del “Grupo de los cinco”, la misma escritora nos los describe así:

En el salón, Korsikna (Rimsky Korsakov) maduró en esos años. Cui, siempre tan cuidadoso y metódico, Balakirev llegado de sus andares religiosos, y Modesto Moussorgsky, perdido y destrozado, escuchaban los bosquejos. En ocasiones, se apoderaba de los cinco una alegría infantil al ver nacer *El príncipe Ígor*, después de años de dudas e incertidumbres; se ponían a gritar y a cantar, a abrazarse, sin avergonzarse de sus palabras, ni de sus exaltaciones.

Por entonces las manifestaciones reaccionarias de las autoridades del régimen zarista se recrudecieron: se suprimió la autonomía de las universidades, los rectores pasaron a ser nombrados por el gobierno y para colmo, se consideró que la participación de las mujeres en la enseñanza de la medicina era signo de sedición, por lo que en 1885 se prohibió el ingreso de las mujeres a la Academia Médico-Quirúrgica de San Petersburgo; con ello se destruyó la obra social por la que Borodin había luchado denodadamente durante años.

En 1887, a punto de terminar su tercera sinfonía, Borodin se disfrazó de campesino ruso para dirigirse a un elegante baile organizado por los profesores de la Academia Médico-Quirúrgica; bailó con gran entusiasmo hasta la media noche, cuando se detuvo a platicar con colegas, se acercó a la pared y se desplomó, golpeándose la cabeza y falleció en el acto. Horas después, en el mismo sitio donde hacía pocas horas Alexander bailaba, se hizo la autopsia y se descubrió que había muerto a consecuencia de la ruptura de un aneurisma de una arteria coronaria, que produjo hemopericardio y tamponamiento cardiaco.

Al día siguiente de su muerte, una enorme multitud acompañó al féretro, llevado en hombros por sus estudiantes, hasta el cementerio Alexander Nevski, donde

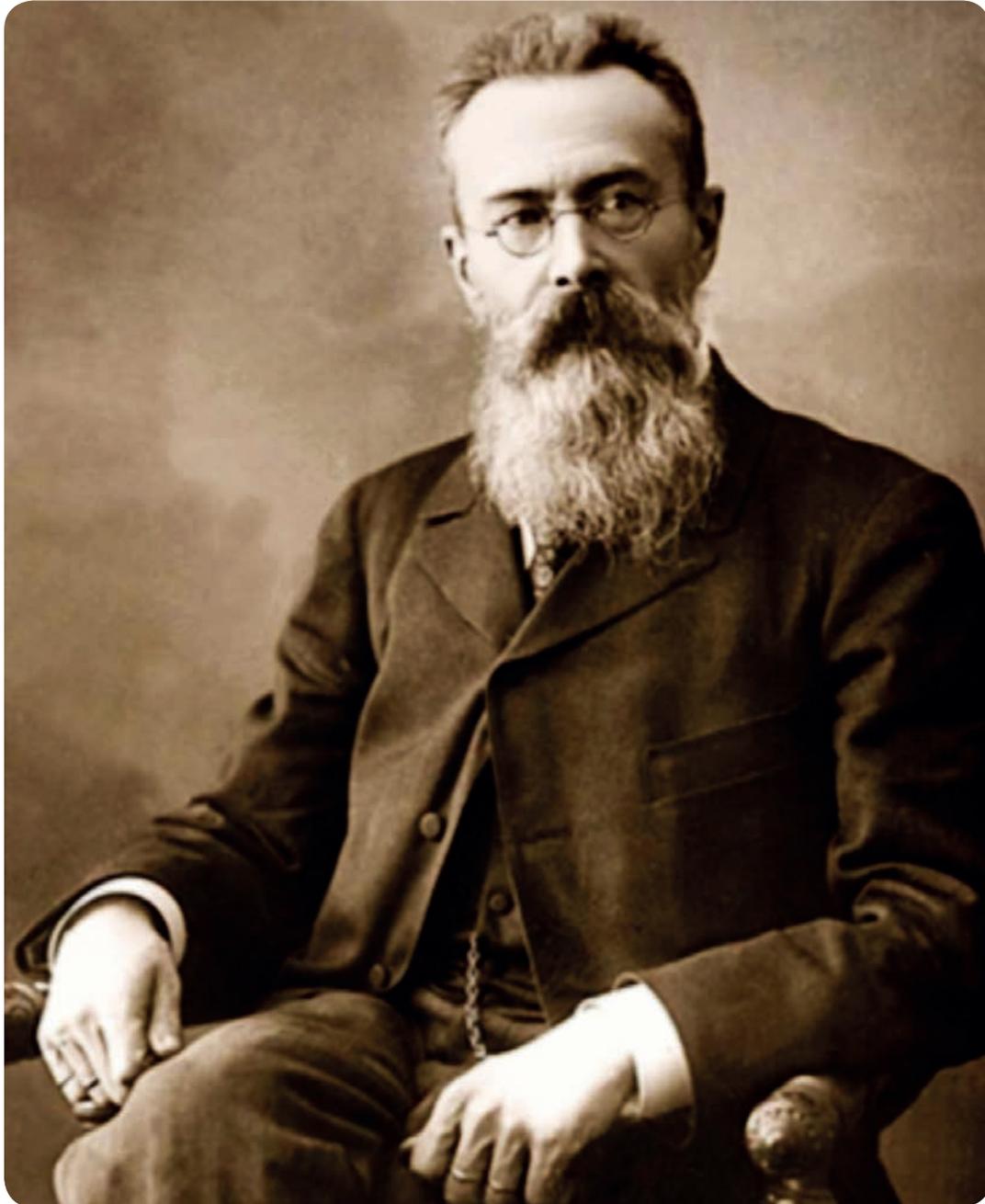
Figura 5.  
TUMBA DE ALEXANDER BORODIN.



Figura 6.  
ALEKSANDR GLAZUNOV.



Figura 7.  
NIKOLÁI RIMSKI-KÓRSAKOV.



fue enterrado cerca de la tumba de Mussorgsky. Después del entierro, sus amigos Rimski-Kórsakov y Glazunov fueron al apartamento de Borodin, recogieron el material incompleto sobre *El príncipe Igor* y decidieron terminarlo, orquestarlo y representarlo, lo que ocurrió en el Teatro Mariinski tres años después, con éxito atronador.

En palabras de sus recientes biógrafos rusos:

En la historia de la ciencia rusa Borodin es reconocido como un académico excepcional, un investigador de amplios intereses, un experimentador osado y un maestro extraordinario. Él formó una galaxia entera de químicos rusos y les transmitió la gloriosa tradición de la ciencia natural, a la que hizo una notable contribución. Sus trabajos en la química, de contenido original y concepción absolutamente novedosa tuvieron un papel trascendente en el desarrollo de la química orgánica.

Y sobre su obra musical se dijo:

Ningún músico ha llegado a la inmortalidad con una producción tan breve y, al mismo tiempo, tan extraordinaria.

Unos 20 trabajos científicos y unas 20 composiciones musicales fueron el legado de Borodin. Pocos premios coronaron su vida profesional. Un reconocimiento tardío fue el premio al mejor musical de Broadway (Kismet) basado en melodías del Príncipe Igor, sobre todo en la famosa “Strangers in paradise”.

¿Logró él la fusión de las dos culturas? Esa doble empresa no menguó su creatividad como químico y como compositor. ¿Una vida más tranquila dedicada sólo a la investigación química lo habría llevado a equivalentes del Premio Nobel?, o, por el contrario, su concentración en la música lo hubiera conducido a la cima de los más grandes compositores de música de la historia?

Tal vez su maestro Zinin tenía razón: “No se pueden capturar dos presas al mismo tiempo”.

Figura 8.  
TEATRO MARIINSKI.



Figura 9.  
*CANTAR DE LAS HUESTES DE ÍGOR.*



## REFERENCIAS

- Berberova, N., *Alexandre Borodine: 1834-1887*, Actes Sud, Arlés, 1989.
- Cole, J. C., "Alexander Borodin, the scientist, the musician, the man", *Journal of the American Medical Association*, 208, 1969: 129-130.
- Figurovskii, N. A. y Y. I. Solov'ev, *Aleksandr Porfir'evich Borodin. A Chemist's Biography*, Springer-Verlag, Berlín, 1988.
- Friedman, H. B., "Alexander Borodin-musician and chemist", *Journal of Chemical Education*, 18, 1941: 521-525.
- Gordin, M. D., "Facing the music: How original was Borodin's chemistry?", *Journal of Chemical Education*, 83, 2006: 561-565.
- Gordin, M. D., "The weekday chemist: the training of Aleksandr Borodin", en Jed Z. Buchwald (ed.), *A Master of Science History. Essays in Honor of Charles Coulston Gillispie*, Springer, Berlín, 2014.
- Hutchings, A. J. B., "A study of Borodin: I. The man", *The Musical Times*, 77, 1936: 881-883.
- Ilić, D. V., "Alexander P. Borodin (1833-1887) – great composer, army physician and distinguished scientist-chemist", *Vojnosanitetski Pregled*, 70, 2013: 233-236.
- Kauffman, G. B. y K. Bumpass, "An apparent conflict between art and science: The case of Aleksandr Porfir'evich Borodin (1833-1887)", *Leonardo*, 21, 1988: 429-436.
- Konstantinov, I. E., "The life and death of professor Alexander P. Borodin: Surgeon, chemist, and great musician", *Surgery*, 123, 1998: 606-616.
- O'Neill, D., "Aber Sontag ist immer ein Feiertag: Alexander Borodin, MD, 1833-1887", *Journal of the Royal Society of Medicine*, 81, 1988: 591-593.
- Podlech, J., "'Try and fall sick...'- The composer, chemist, and surgeon Aleksandr Borodin", *Angewandte Chemie International Edition*, 49, 2010: 6490-6495.
- White, A. D., "Alexander Borodin: Full-time chemist, part-time musician", *Journal of Chemical Education*, 64, 1987: 326-327.



# La sopa primitiva y la química del origen de la vida

ANTONIO LAZCANO ARAUJO

## INTRODUCCIÓN

Aunque Jöns Jacob Berzelius era un joven petulante y un pésimo estudiante de medicina, muy pronto sus maestros y amigos se percataron de su extraordinaria habilidad experimental y su dominio magistral de la física y la química. Atraído por el estudio de la electricidad, a principios del siglo XIX Berzelius comenzó a estudiar primero los efectos terapéuticos de lo que se conocía entonces como corrientes galvánicas, pero pronto se interesó en el efecto de las corrientes eléctricas en soluciones de distintas sustancias. No tardó en percatarse de un fenómeno muy peculiar: al pasar una corriente eléctrica por una solución acuosa, muchos compuestos químicos se descomponían en dos partes y, dependiendo de su carga, se acumulaban en el cátodo o en el ánodo.

Estas observaciones llevaron a Berzelius a proponer lo que llamó el dualismo electroquímico de la materia. Ello le permitió descubrir varios elementos químicos, pero no tardó en darse cuenta que había muchas sustancias, sobre todo aquéllas de origen biológico y ricas en carbono, nitrógeno, hidrógeno y oxígeno, que no mostraban este comportamiento. Llegó así a la conclusión que estos compuestos, a los que llamó “orgánicos” por provenir de plantas o animales, no estaban sujetos del todo a las leyes de la física y la química, sino que parecían estar animados por una energía inasible a la que no tardó en llamar fuerza vital. Las ideas de Berzelius no sólo marcaron el nacimiento de lo que ahora conocemos como química orgánica, sino que, a contracorriente de las tendencias secularizantes que venían reforzando una visión materialista de los fenómenos biológicos, de manera explícita sugerían que los seres vivos estaban definidos por una fuerza de carácter metafísico que no era susceptible de ser descrita por métodos científicos.

Sin embargo, pocos años más tarde, las evidencias experimentales comenzaron a apuntar en un sentido contrario a las ideas de Berzelius. Fue precisamente uno de sus antiguos estudiantes, Friedrich Wöhler, quien en 1828 demostró que

al calentar en el laboratorio una solución acuosa de cianato de amonio se producía urea “sin necesidad de un riñón animal”, como le contó en una carta a su amigo y colega Justus von Liebig. Muy pronto empezaron a aparecer reportes similares, que mostraban que las barreras entre los compuestos inorgánicos y la llamada química orgánica no eran infranqueables, porque se sintetizaron en el laboratorio azúcares, aminoácidos, hidrocarburos y muchas otras moléculas. Se desarrolló así una situación muy peculiar. A diferencia de muchas otras disciplinas como la biología, la astronomía y la geología, la química había permanecido ajena al enfoque evolutivo que permeó las ciencias naturales y exactas durante el siglo XIX. Así, aunque la caracterización cada vez más detallada de la composición química de los organismos dio origen a la bioquímica, por una parte y, por otra, existía un número cada vez mayor de reportes de la formación en el laboratorio de las sustancias presentes en los organismos, no existía un marco de referencia que permitiera explicar la transición de lo inerte a lo vivo, de lo inorgánico a lo orgánico.

#### DARWIN VS. OWEN: UNA DISPUTA OLVIDADA

En 1863 el boletín del Athenæum, un exclusivo club inglés al que pertenecían nobles, banqueros, naturalistas, políticos y uno que otro presbítero, publicó una reseña anónima en donde se criticaba a Darwin por haber apelado en el capítulo final de la tercera edición de *El Origen de las Especies* a un soplo divino para explicar el origen de la vida. No tardó en saberse que el autor del texto era Richard Owen, un espléndido anatomista cuya mezquindad le había ganado el rechazo y la desconfianza de muchos de sus contemporáneos, incluyendo la del propio Charles Darwin. Este último le envió a su amigo y confidente Joseph Dalton Hooker una carta donde se arrepentía de haber usado términos religiosos cuando, escribió, en realidad, “lo que deseaba era decir que [la vida] había surgido por un proceso del que nada sabemos ahora”. Profundamente indignado por los reproches de Owen, Darwin escribió a los editores del boletín del Athenæum afirmando que “debe de haber habido una época en la que en nuestro planeta existían únicamente elementos inorgánicos y, supongamos que la atmósfera pestilente era rica en ácido carbónico, compuestos nitrogenados, fósforo, etc. ¿Existe alguna evidencia, por tenue que sea, que apoya la creencia de que estos elementos, en ausencia de compuestos orgánicos y como resultado únicamente de las fuerzas que conocemos, podría haber producido un ser vivo? En el momento actual esta posibilidad nos resulta absolutamente inconcebible”.

Ocho años más tarde Darwin retomó el tema en una carta que le envió a Hooker y le dijo que “a menudo se dice que las condiciones necesarias para el surgimiento de la vida aún persisten. Pero sí (¡y que sí tan grande!) pudiéramos imaginar

la presencia en un pequeño charco de agua tibia en donde hubiera toda suerte de sales amoniacales y fosfóricas, y con la presencia de luz, calor, electricidad, etc. de un compuesto proteínico formado químicamente, listo para sufrir cambios más complejos, en la actualidad dicha sustancia sería instantáneamente devorada o absorbida, lo cual no hubiera ocurrido antes de la aparición de la vida”.

La carta de Darwin comenzó a ser conocida hasta 1969, cuando Melvin Calvin la incluyó en su libro sobre evolución química, pero la metáfora del pequeño charco darwinista arraigó muy rápidamente en el imaginario popular y científico. ¿Y cómo fue que surgió la vida en la Tierra? ¿Existieron los charcos primordiales que Darwin imaginó? ¿Cuándo aparecieron los primeros seres vivos en nuestro planeta? Aunque no sabemos a ciencia cierta cuál es la respuesta a estas preguntas, en las últimas décadas ha crecido la certeza en un número cada vez mayor de investigadores, que hace unos 3.5 mil millones de años el planeta ya se encontraba poblado por una biósfera microbiana extraordinariamente diversa. Desafortunadamente, uno de los problemas enfrentados más acuciosos es el de la ausencia de rocas sedimentarias de más de 3.5 mil millones de años. Es decir, el registro geológico no nos permite, al menos por el momento, reconstruir las condiciones ambientales que tenía la Tierra cuando apareció la vida: no conocemos cuál era la composición de la atmósfera terrestre, la temperatura de la superficie de nuestro planeta o la extensión de los mares primitivos. No es de extrañar, pues, que esta situación haya llevado al desarrollo de diferentes explicaciones (e incluso antagónicas) sobre la naturaleza de los primeros seres vivos y los procesos que llevaron a su origen.

A pesar de tales incertidumbres, todo indica que la mejor explicación sobre el origen de la vida descansa en los postulados propuestos hace ya casi un siglo por Alexander I. Oparin, un joven científico ruso que pocos años luego de haberse graduado de la Universidad de Moscú, y en medio de los dramáticos cambios sociales que vivía el Imperio ruso al transformarse en la Unión Soviética, sugirió que los primeros seres vivos habían sido bacterias heterótrofas anaerobias que se formaron y nutrieron a partir de los compuestos orgánicos sintetizados en la Tierra primitiva, y que se habían acumulado en los mares del planeta formando lo que llamamos ahora la sopa prebiótica. Según Oparin, la formación de las moléculas orgánicas precursoras de los primeros seres había sido posible gracias a la ausencia de oxígeno libre en la atmósfera terrestre, que no se había comenzado a acumular en nuestro planeta sino hasta la aparición, muchos millones de años después del origen de la vida, de los primeros microorganismos fotosintéticos.

El interés de Oparin por la bioquímica y la fisiología vegetal le había llevado a conocer a Alexei Nikolaevich Bakh, un investigador cuya intensa actividad política y distintos exilios no le habían impedido darse tiempo para estudiar la química de la respiración y el metabolismo de las plantas. Oparin no tardó en

incorporarse al grupo de trabajo que Bakh dirigía en el Instituto Karpov de Fisiocoquímica de Moscú, pero al mismo tiempo asistía a las reuniones semanales que Kliment Arkadievich Tymiriazev, quien había traducido y divulgado la obra de Darwin en Rusia, organizaba en su casa. Así pues, a una educación que fiel a la tradición intelectual de los científicos rusos había enfatizado la visión integral de los problemas biológicos, Oparin pudo crearse un bagaje intelectual que incluía conocimientos profundos de química y bioquímica, así como de fisiología celular y de historia natural, al lado de una enorme familiaridad con los conceptos y la metodología de trabajo de los darwinistas, que había aprendido al lado de Tymiriazev.

En 1936 Oparin publicó una versión ampliada de su primer libro. Este segundo libro es de una madurez intelectual sorprendente y aunque fue traducido al inglés dos años más tarde, la fase moderna del estudio del origen de la vida no comenzó sino hasta luego de la Segunda Guerra Mundial. Fue hasta 1952 cuando Harold C. Urey, un distinguido investigador estadounidense que había recibido el Premio Nobel por su descubrimiento del deuterio, y que se encontraba por ese entonces enseñando en la Universidad de Chicago, publicó un modelo de atmósfera primitiva similar al sugerido por Oparin. Ese mismo año, Stanley L. Miller, un joven químico que había comenzado sus estudios de doctorado en dicha institución, escuchó a Urey hablar de sus modelos de la Tierra primitiva y al cabo de unas cuantas semanas se le acercó y le pidió asesoría para llevar a cabo una simulación de los procesos que permitieron la síntesis de compuestos orgánicos necesarios, según Oparin, para la aparición de la vida. Aunque al principio Urey rechazó el proyecto, eventualmente aceptó convertirse en tutor de Miller y juntos llegaron a la conclusión de que las descargas eléctricas habían sido una de las fuentes de energía más abundantes en el planeta.

Ambos diseñaron un experimento usando un par de matraces conectados entre sí y sellados con cuidado, en cuyo interior colocaron una mezcla de gases que incluía hidrógeno, metano, amoníaco y vapor de agua, y que Miller sometió a la acción de descargas eléctricas. Para su sorpresa, Miller se percató que en muy poco tiempo se sintetizaban, en las condiciones ambientales propuestas por Oparin, cantidades importantes de aminoácidos tanto proteínicos como no proteínicos, hidroxácidos, urea y otros compuestos de importancia biológica. El estudio del origen de la vida entró así en una fase experimental que permite simular en el laboratorio la forma en la que se pudieron acumular compuestos orgánicos en la Tierra primitiva de donde surgieron los primeros organismos. Es decir, se puede comenzar a comprender la transición de lo inerte a lo vivo incorporando la química orgánica a una óptica evolutiva de la aparición de la vida.

El trabajo fue publicado en 1953 y despertó un interés enorme no sólo en la comunidad científica sino también en la prensa y en el gran público. Apareció pocas semanas después del artículo en donde Watson y Crick proponían el modelo

de la doble hélice del ácido desoxirribonucleico (DNA, por sus siglas en inglés), que marcó el inicio de una etapa a partir de la cual muchos creyeron que la única forma de explicar adecuadamente los procesos biológicos esenciales era desde una óptica estrictamente molecular. En el mismo año habían nacido, pues, tanto la biología molecular como la química prebiótica, y como ocurrió en muchas otras áreas de las ciencias de la vida, a partir de ese momento la validación de las hipótesis sobre el origen de la vida comenzó a depender de su consistencia con la información cada vez más rica y sofisticada que provenía de las evidencias de la estructura, función y replicación del DNA. El experimento más importante que siguió al de Miller lo llevó a cabo Joan Oró en 1960, un químico catalán avecindado en Houston, que demostró cómo la condensación de cinco moléculas de ácido cianhídrico (HCN, por sus siglas en inglés), un compuesto que se formaba con facilidad en el experimento de Miller y que está presente en las nubes de material interestelar y en los núcleos de cometas, daba lugar a la adenina, una de las bases nitrogenadas presentes en el DNA, el ácido ribonucleico (RNA, por sus siglas en inglés), el trifosfato de adenosina (ATP, por sus siglas en inglés) y en muchas coenzimas. Se había establecido así la conexión entre la evolución prebiológica y la biología molecular, lo que se tradujo en un empeño comprensible por tratar de entender el origen de polímeros genéticos primitivos capaces de replicarse por sí mismos.

#### EL PODER DE LAS METÁFORAS: LA SOPA PRIMITIVA

En 1929 John B. S. Haldane, uno de los científicos y pensadores más originales del siglo XX, publicó en una revista inglesa un pequeño ensayo titulado *El Origen de la Vida*. Oparin y Haldane no se conocieron en persona sino hasta varias décadas más tarde, pero había similitudes extraordinarias entre sus puntos de vista. Al igual que Oparin, Haldane sostenía que los primeros organismos habían resultado de la evolución de compuestos orgánicos que se habían formado en una atmósfera carente de oxígeno libre y que se habían acumulado en los mares de la Tierra primitiva, que tenían “la consistencia de una sopa caliente diluida”. Ni Oparin ni Haldane conocían los textos en donde Darwin habla de su pequeño charco, pero al igual que ocurrió con el diablillo de Maxwell y el gato de Schrödinger, la metáfora de la sopa primitiva no tardó en incorporarse al lenguaje científico.

Las metáforas, afirmó el polifacético lord Francis Bacon en el siglo XVII, deben ser vistas más como un producto del ingenio que como una muestra de sabiduría científica. Tenía razón: la metáfora de la sopa primitiva y sus equivalentes como “el pequeño charco darwinista” o “el caldo primitivo” se han prestado a distintas interpretaciones, incluyendo la de un océano prebiótico rico en toda

la gama de compuestos bioquímicos y en donde abundaban moléculas capaces de replicarse a sí mismas, similares o idénticas al DNA. En realidad, para muchos de los que estudian la aparición de los primeros organismos “la sopa primitiva” es un término amplio que incluye los ambientes planetarios en donde la síntesis abiótica y la acumulación de compuestos orgánicos pudieron haber tenido lugar, y que incluyen sedimentos oceánicos, zona intermareal, charcos y cuerpos acuosos poco profundos que pudieron haber estado sujetos a ciclos de desecación y, como lo propuso John D. Bernal en 1944, zonas en donde las arcillas y otros minerales pudieron haber contribuido a la acumulación e interacción de las moléculas orgánicas presentes en la Tierra primitiva.

Los esfuerzos pioneros de Miller y Oró han tenido muchos seguidores que no sólo han confirmado sus resultados iniciales, sino que los han ampliado y refinado en forma extraordinaria. En los 60 años que han transcurrido desde que dieron a conocer sus resultados, se ha podido demostrar una y otra vez la facilidad con la que podemos sintetizar en condiciones prebióticas algunas pirimidinas (que son las bases complementarias a las purinas, el tipo de moléculas al que pertenece la adenina), azúcares, lípidos y muchas moléculas más de interés biológico. Podemos obtener compuestos catalíticos que ayudan a unir aminoácidos, cadenas de nucleótidos y hasta moléculas lipídicas, las cuales al entrar en contacto con el agua se organizan espontáneamente y forman sistemas conocidos como micelas y liposomas, que poseen en su interior un medio acuoso y pudieron haber sido precursores de las células actuales. Todo ello apoya fuertemente la hipótesis de que, en efecto, en la Tierra primitiva hubo un caldo prebiótico que proveyó las sustancias que al evolucionar dieron origen a las primeras formas de vida.

La posibilidad de la sopa primitiva se ve también apoyada por los estudios químicos de meteoritos pétreos ricos en compuestos orgánicos, cuya existencia quedó demostrada desde que se analizaron muestras del meteorito de Orgueil, que cayó en Francia en 1864. En ese entonces no todos quedaron convencidos de que los hidrocarburos que se habían detectado en el Orgueil fueran realmente extraterrestres, pero la situación cambió en 1969, cuando cayó en Australia un meteorito que resultó tener 4.6 mil millones de años, la misma edad del sistema solar. Este pequeño cuerpo, que hoy conocemos como el meteorito de Murchison, ha sido analizado con una enorme precisión gracias a los laboratorios que la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) se habían montado para estudiar las muestras lunares. Los resultados de estos estudios han sido espectaculares: el meteorito Murchison posee hidrocarburos tanto lineales como aromáticos, así como una gama amplísima de aminoácidos proteínicos y no proteínicos, ácidos dicarboxílicos, compuestos derivados de azúcares, algunas de las bases púricas y pirimídicas, así como moléculas lipídicas capaces de formar membranas de doble capa, entre muchos otros. Aunque carecemos de una

muestra de la sopa primitiva, el análisis del Murchison muestra que se estaban formando la Tierra y otros planetas, en el sistema solar ocurría una serie de procesos químicos que permitían la síntesis y la acumulación de compuestos orgánicos, lo cual ciertamente apoya la idea de que en nuestro planeta ocurrían procesos similares. Aunque no todos los meteoritos poseen la misma variedad de moléculas orgánicas, la caída del Murchison sugiere que la sopa primitiva pudo haber sido sazonada con material orgánico extraterrestre que llegó a nuestro planeta a bordo de cometas, meteoritos y asteroides, enriqueciendo el medio ambiente prebiótico con una enorme cantidad y diversidad de moléculas de importancia bioquímica.

Sin embargo, hay que ponderar críticamente estos resultados. Como ha demostrado el grupo de Jason Dworkin y Daniel Glavin, de la NASA Goddard, en distintos meteoritos se han detectado cerca de 90 aminoácidos diferentes. No tenemos duda que se originaron abióticamente durante las primeras etapas de evolución del sistema solar, pero su extraordinaria diversidad nos obliga, por una parte, a reflexionar sobre los mecanismos que permitieron que solamente unos pocos de ellos se incorporaran a los sistemas biológicos. Por otro lado, a la fecha no hemos descubierto en los meteoritos aminoácidos como la histidina, arginina y lisina, que son aminoácidos esenciales en los seres vivos. ¿Significa que no son resultado de procesos abióticos, sino que se formaron gracias a la evolución biológica?, ¿o que no hemos sabido detectarlos en las muestras extraterrestres? En todo caso, debemos ponderar con cuidado la información de meteoritos, sobre todo cuando tratamos de extrapolarlos a la Tierra primitiva, y a su papel en la formación de la sopa primitiva.

## EL MUNDO DEL RNA

Inspirado tanto por el modelo de la doble hélice como por el experimento de Miller, en 1959 Hermann J. Müller, uno de los grandes genetistas del siglo pasado, afirmó que la vida había aparecido en la Tierra cuando se había formado en la sopa primitiva una molécula de DNA que había comenzado a replicarse y a mutar hasta dar origen a la enorme diversidad biológica que vemos en nuestros días.

Aunque las ideas de Müller estaban basadas en una visión estrictamente materialista, su propuesta, al igual que muchas otras que en el pasado habían apelado a la idea de la generación espontánea, no daba elemento alguno para poder desarrollar un programa de investigación que permitiera comprender cómo habían surgido las primeras entidades vivas. Reflejaba, eso sí, la profunda división que existía entre quienes estudiaban el origen de la vida. Por una parte se encontraban los que sostenían que lo primero en surgir había sido el DNA, donde se replica y almacena la información genética, pero había un grupo igualmente numeroso que sostenía que las proteínas habían aparecido antes, ya que son los catalizadores

más conspicuos de los procesos bioquímicos básicos e indispensables para la replicación misma de los ácidos nucleicos. Es cierto que había quienes sugerían que los primeros seres vivos habían resultado de la coevolución de ambos tipos de moléculas, pero esta alternativa tampoco parecía resolver el problema.

Existía la convicción generalizada de que el RNA había surgido primero que el DNA. Esta idea, hoy en día con muchas evidencias a favor, resultó de una serie de premisas incorrectas. Muchos creían que debían considerarse a los virus, que se pueden cristalizar y son de una simplicidad asombrosa si los comparamos con sus hospederos celulares, como los representantes de la transición entre lo inerte y lo vivo y, por lo tanto, como entidades primitivas. Como se conocían virus, como el del mosaico de tabaco, en donde el material genético es RNA y no DNA, muchos concluyeron que el RNA es un polímero genético más antiguo.

Por esos años un grupo de bioquímicos como A. E. Mirsky, J. Brachet, P. Handler, R. E. Eakin, pero sobre todo Andrei N. Belozerskii, un colega de Oparin, comenzaron a subrayar la ubicuidad de las moléculas de RNA en distintos procesos celulares y el hecho de que muchas coenzimas, sin las cuales muchas proteínas no pueden promover la catálisis biológica, son en realidad ribonucleótidos modificados. Haciendo gala de una intuición envidiable, Belozerskii interpretó estas observaciones en términos evolutivos y no sólo propuso que el RNA era más antiguo que el DNA, sino también sugirió que las coenzimas pudieron haber jugado un papel más conspicuo en los metabolismos ancestrales. Sin embargo, no fue sino unos años más tarde cuando un grupo de científicos propuso, de manera independiente, que el RNA había precedido no sólo al DNA también a las proteínas. Es decir, que al inicio de la evolución biológica la catálisis biológica dependía no de proteínas sino del RNA mismo. Esta idea fue sugerida primero por Alex Rich en 1962, luego por Carl R. Woese en 1967 y, un año más tarde, por Francis Crick y por Leslie Orgel, quienes desarrollaron un esquema extraordinariamente detallado de lo que ahora conocemos como la hipótesis del mundo del RNA.

A pesar del enorme prestigio de estos científicos, muchos desdeñaron esta posibilidad por considerarla una especulación sin fundamento. Es muy probable que ello se haya debido no sólo a que, en términos generales, por esas épocas la biología molecular se estaba desarrollando en la ausencia de un marco evolutivo, sino también por la idea, profundamente arraigada entre muchos investigadores, de las proteínas como los únicos catalizadores biológicos. Sin embargo, en 1982 los grupos de Thomas Cech y Sidney Altman descubrieron, de manera independiente y casi accidental, que algunas moléculas de RNA, a las que ahora llamamos ribozimas, poseían propiedades catalíticas. Es decir, el RNA es un ácido nucleico que puede almacenar información genética, y también se comporta como las proteínas y cataliza diversas reacciones bioquímicas.

El descubrimiento de las ribozimas ha venido a reforzar la hipótesis de lo que hoy llamamos el mundo del RNA, y ha permitido diseñar experimentos que simulan lo que pudo haber ocurrido en la Tierra primitiva. Se han aislado ribozimas, por ejemplo, que pueden leer cadenas sencillas de RNA y formar una cadena complementaria, lo cual demuestra que en principio se podría haber obtenido la replicación del RNA en ausencia de enzimas. Los modelos de los sistemas precelulares que pudieron haber antecedido a los primeros sistemas vivos se han ido refinando. Por ejemplo, el grupo de Jack Szostak, de la Universidad de Harvard, ha logrado introducir ribozimas al interior de liposomas que empiezan a funcionar como pequeños reactores químicos y polimerizan nucleótidos. El estudio de las propiedades de las ribozimas ha modificado en forma profunda varios conceptos de la biología molecular al demostrar, por ejemplo, que la formación del enlace peptídico que une a los aminoácidos en el interior del ribosoma es catalizada no por las proteínas ribosomales, sino por el RNA mismo. Desde una óptica evolutiva, estos resultados tienen implicaciones profundas. Por una parte, simplifican enormemente el estudio del origen de la vida, ya que vuelven plausible la idea de un mundo de RNA, en donde la catálisis de procesos ancestrales dependía de ribozimas y, al mismo tiempo, indican que la síntesis de proteínas (y el código genético mismo, en consecuencia) es un producto de la evolución del mundo del RNA.

#### CONCLUSIONES: EL MITO DE LA MOLÉCULA VIVIENTE

¿Cuándo y cómo surgió el RNA? Aunque en las últimas décadas el papel central que juegan distintas formas de RNA en los procesos biológicos básicos ha quedado firmemente establecido, no es fácil comprender cómo se pudo haber formado en las aguas de los mares primitivos. Aunque la síntesis prebiótica de purinas es un proceso rápido y eficiente, no ocurre lo mismo con las pirimidinas, pues tenemos que enfrentar problemas como la síntesis y acumulación de la D-ribosa, el azúcar de cinco carbonos que está en el esqueleto del RNA y es una molécula sumamente inestable. No hay modelos convincentes que expliquen satisfactoriamente los mecanismos de fosforilación que pudieron haber formado ribonucleótidos y no es fácil imaginar la formación de polímeros de estas moléculas en la Tierra primitiva. Aunque los estudios estructurales de los ribosomas indican que la síntesis de proteínas surgió en un mundo de RNA, no es fácil encontrar modelos experimentales de ribozimas que hubieran podido catalizar la replicación de los genomas primitivos.

Toda la evidencia disponible indica que la sopa primitiva debe haber sido una mezcla extraordinariamente rica de especies inorgánicas y de moléculas orgánicas, muchas de ellas de importancia bioquímica. A pesar del énfasis con el que Müller defendió hace muchos años la idea de que los primeros seres vivos surgie-

ron al aparecer espontáneamente una molécula de DNA, es obvio que las funciones celulares no se pueden reducir a un solo compuesto o a una sola molécula, por compleja que sea. No hay moléculas vivientes —la vida es una manifestación de las propiedades de conjuntos de moléculas— y tal vez la mejor definición del mundo del RNA sea una que reconozca el papel de conjuntos de diversos compuestos interaccionando entre sí, probablemente en el seno de sistemas como los liposomas, en donde el RNA jugaba un papel más conspicuo que hoy en día en la replicación y en las reacciones que precedieron a los primeros metabolismos. Así, aunque no sepamos cómo surgieron los primeros organismos, las síntesis prebióticas, la posibilidad de una sopa primitiva y la hipótesis del mundo del RNA nos proporcionan un marco de referencia evolutivo para ir interpretando hallazgos, planeando experimentos y refinando las preguntas que nos hacemos en torno al origen de la vida. Ello es, en sí mismo, un logro científico extraordinario.

Figura 1.  
EL EXPERIMENTO DE MILLER-UREY.

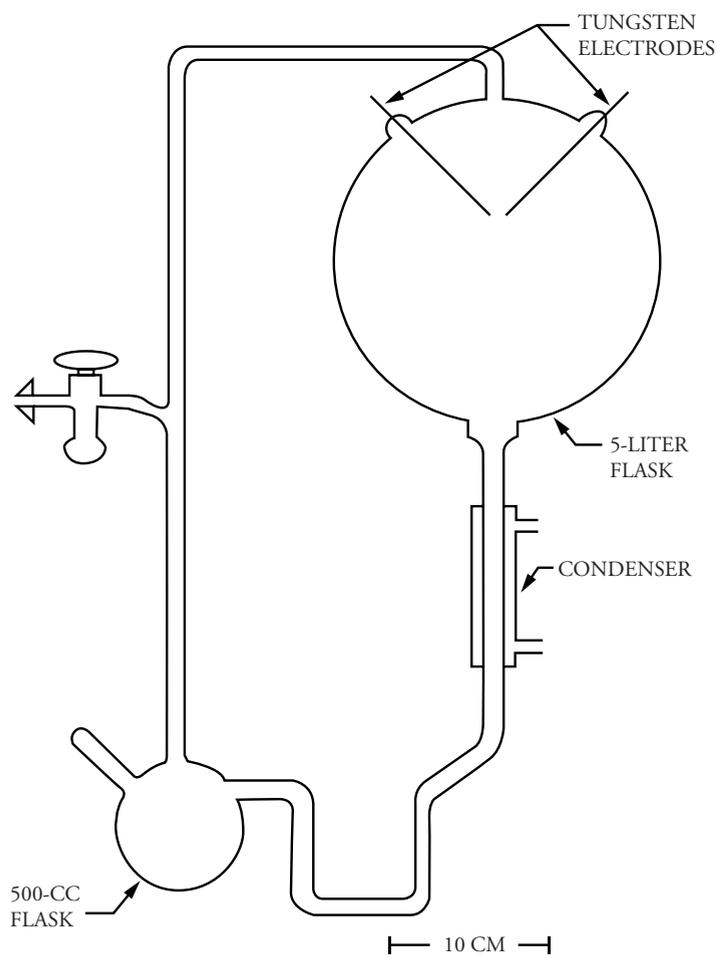
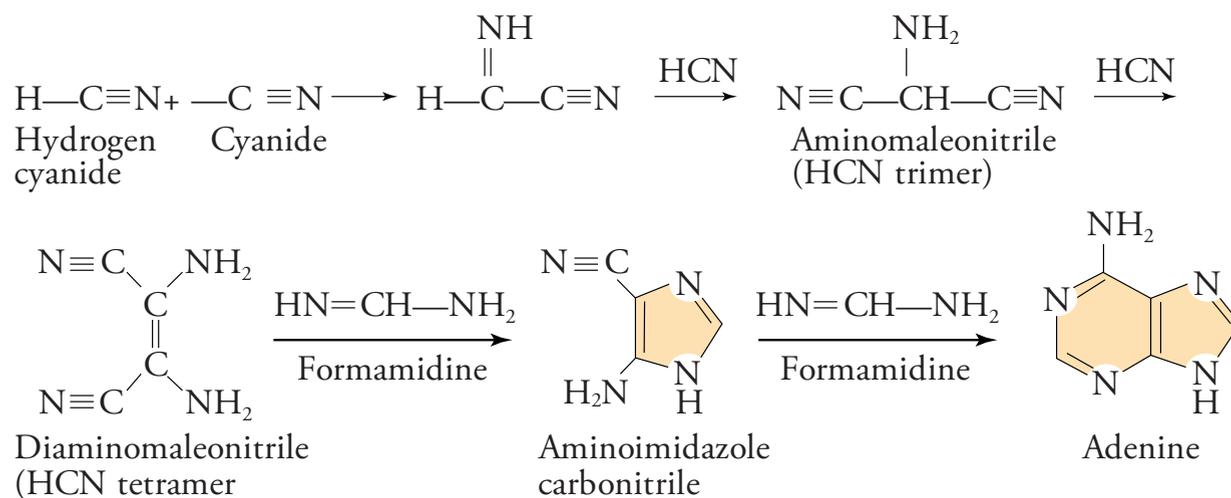


Figura 2.  
SÍNTESIS PREBIÓTICA DE LA ADENINA  
A PARTIR DEL HCN.

(A)



(B)

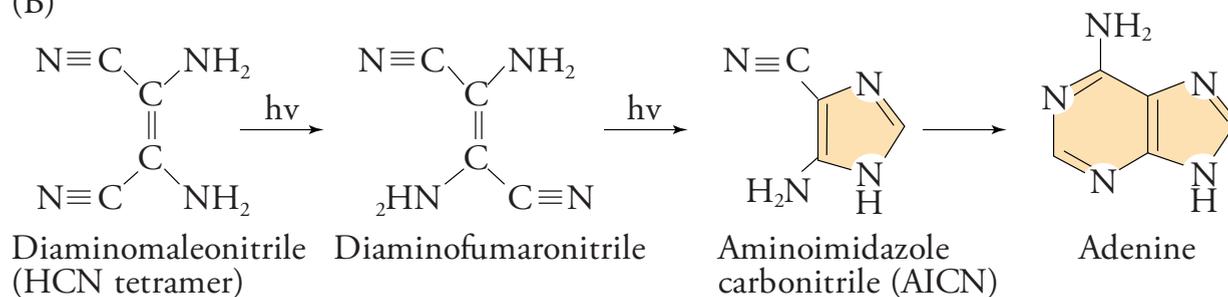
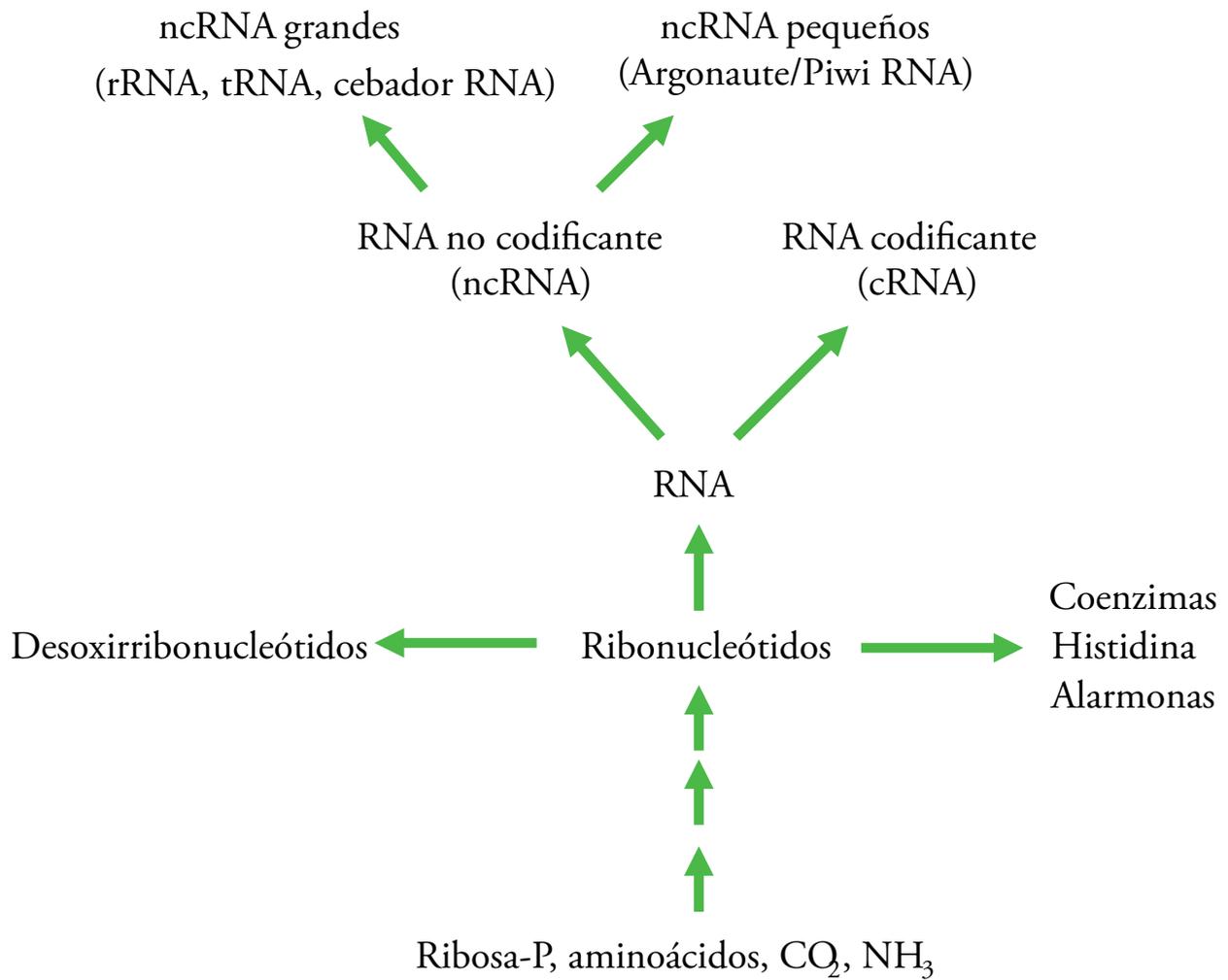


Figura 3.

EL PAPEL DEL RNA Y LOS RIBONUCLEÓTIDOS EN PROCESOS CELULARES CONTEMPORÁNEOS.



Lazcano, 2014.

## REFERENCIAS

- Burton, A. S., J. C. Stern, J. E. Elsila, D. P. Glavin y J. P. Dworkin, "Understanding prebiotic chemistry through the analysis of extraterrestrial amino acids and nucleobases in meteorites", *Chemical Society Reviews*, 41 (16), 2012: 5459-5472.
- Deamer, D. W., *First Life: Discovering the Connections between Stars, Cells and How Life Began*, University of California Press, Berkeley, 2011.
- Eschenmoser, A., Chemical etiology of nucleic acid structure, *Science*, 284 (5423), 1999: 2118-2124.
- Gilbert, W., "The RNA world", *Nature*, 319 (6055), 1986: 618.
- Hanczyc, M. M., S. M. Fujikawa y J. W. Szostak, "Experimental models of primitive cellular compartments, encapsulation, growth, and division", *Science*, 302 (5645), 2003: 618-622.
- Lazcano Araujo, A., "El mundo microbiano: origen y evolución", en Ana Flisser (ed.), *Temas selectos de microbiología médica e infectología*, Universidad Veracruzana, Xalapa, 2015, pp. 15-28.
- Lazcano, A., G. E. Fox y J. Oró, "Life before DNA: The origin and evolution of early Archean cells", en R. P. Mortlock (ed.), *The Evolution of Metabolic Function*, CRC Press, Boca Raton, 1992, pp. 237-295.
- Miller, S. L., "A production of amino acids under possible primitive Earth conditions", *Science*, 117 (3046), 1953: 528.
- Oró, J., "Synthesis of adenine from ammonium cyanide", *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2, 1960: 407-412.
- Peretó, J., J. L. Bada y A. Lazcano, "Charles Darwin and the origins of life", *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 39 (5), 2009: 395-406.
- Strathern, P., *Mendeleev's Dream: The Quest for the Elements*, Penguin Books, Nueva York, 2001.
- Urey, H. C., "On the early chemical history of the Earth and the origin of life", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 38 (4), 1952: 351-363.



# La química del medio interestelar

LUIS FELIPE RODRÍGUEZ JORGE

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayoría de los científicos apoyamos la idea de que el universo tuvo un momento de inicio hace 13 mil 800 millones de años. No entendemos bien qué pasó antes e inclusive si tiene sentido hablar de un antes porque en ese momento se crearon no sólo la materia sino también el espacio y el tiempo.

En ese remoto instante, el universo era muy caliente y el espacio se expandía aprisa. A este escenario se le conoce como “La Gran Explosión” (traducción del inglés de *Big Bang*). Con la expansión, que continúa hasta el presente, la temperatura del universo fue descendiendo. Pasados unos minutos, la temperatura del universo había bajado a “sólo” mil millones de grados Kelvin.<sup>1</sup> Los procesos termonucleares que habían estado ocurriendo hasta entonces cesaron y la composición química del universo quedó congelada.<sup>2</sup>

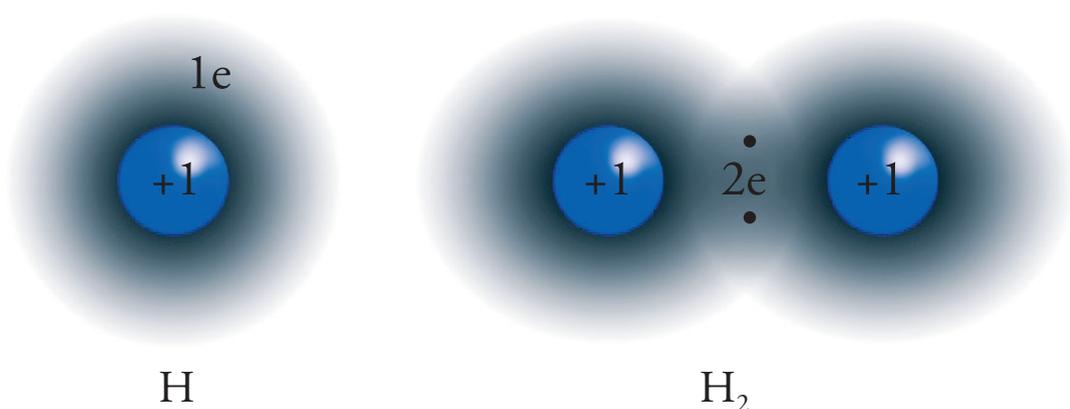
Esta composición inicial ofrecía muy pocas posibilidades para la química. De cada diez átomos presentes, nueve eran de hidrógeno y uno de helio. Había cantidades minúsculas de otros átomos como el deuterio y el litio, de los cuales no nos ocuparemos. El helio es un elemento “noble”, lo cual, esencialmente, quiere decir que es químicamente inerte y que normalmente no forma moléculas. Esto es así porque en el helio los electrones forman una capa cerrada alrededor del núcleo que blindan al átomo e impiden que se combine con los otros átomos. El hidrógeno, por su parte, puede formar la molécula de hidrógeno (dos átomos de hidrógeno enlazados, véase figura 1).

<sup>1</sup> La escala de grados Kelvin o (absoluta) es igual a la más familiar escala de grados centígrados (o Celsius) más 273 grados. Así, la temperatura de cero grados centígrados (a la que se congela el agua a nivel del mar), equivale a + 273 grados Kelvin.

<sup>2</sup> Los primeros minutos del universo están descritos en el recomendable libro *Los tres primeros minutos del universo*, de Steven Weinberg.

Figura 1.

EL ÁTOMO DE HIDRÓGENO, H (IZQUIERDA), ESTÁ CONSTITUIDO POR UN PROTÓN (+1) Y A SU ALREDEDOR UN ELECTRÓN (e). LA MOLÉCULA DE HIDRÓGENO, H<sub>2</sub> (DERECHA), ESTÁ FORMADA POR LA UNIÓN DE DOS ÁTOMOS DE HIDRÓGENO, O SEA DE DOS PROTONES QUE COMPARTEN DOS ELECTRONES A SU ALREDEDOR.



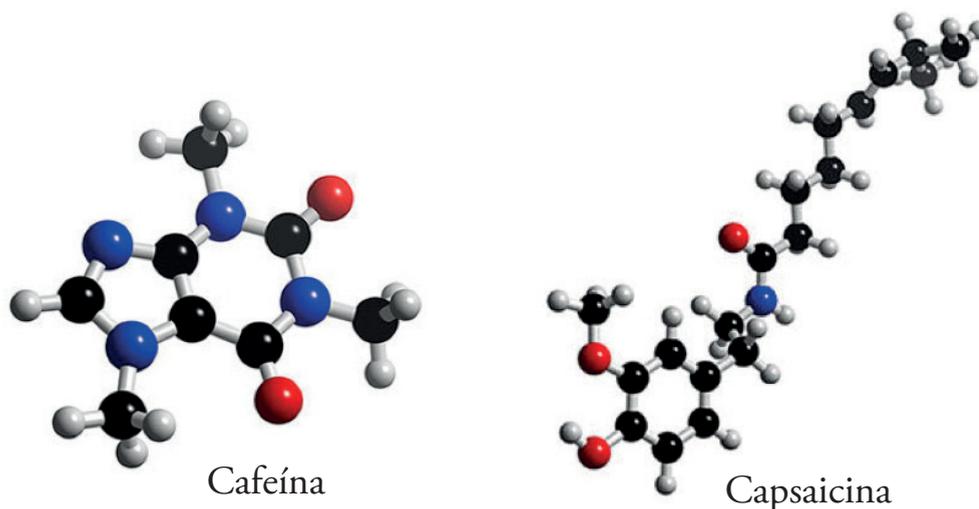
Los átomos pueden ser considerados como la unidad básica de la materia, los ladrillos con los que está construido el mundo que nos rodea. Se conocen sólo 118 átomos, que combinados de muy distintas maneras pueden formar una infinidad de estructuras diferentes. A su vez, una molécula es una entidad que está constituida por dos o más átomos. Para hacer una analogía con el lenguaje, podemos decir que los átomos equivalen a las letras del alfabeto (que son sólo 27) y las moléculas a las palabras (que son un número muchísimo más grande). También podemos argumentar que las moléculas son estados de la materia más complejos que los átomos, pues presentan multitud de atributos que quedan evidentes en los estudios químicos, y el cambio de un solo átomo en una molécula dará lugar a algo con propiedades que pueden ser radicalmente diferentes. Finalmente, son sistemas de muchas moléculas de diferentes tipos los que constituyen a la célula, la unidad básica estructural y funcional de los organismos vivos. Podemos decir que el camino hacia la vida pasa inevitablemente por las moléculas.

PERO ¿DE DÓNDE VIENEN LOS OTROS ÁTOMOS?

Habíamos dicho que la composición inicial del universo era básicamente de átomos de hidrógeno y helio. Entonces, ¿de dónde vienen los otros muchos átomos (carbono, oxígeno, nitrógeno, calcio, fierro, etc.) que forman la tabla periódica de los elementos, a las estrellas y a nosotros mismos? Pasados unos 400 millones de años del inicio del universo, la expansión continuaba, pero en algunas

Figura 2.

REPRESENTACIONES DE LA MOLÉCULA DE LA CAFEÍNA (IZQUIERDA) Y LA DE LA CAPSAICINA (DERECHA). EL COLOR DE LAS ESFERAS NOS INDICA DE QUÉ ÁTOMO SE TRATA: GRIS = HIDRÓGENO, NEGRO = CARBONO, AZUL = NITRÓGENO Y ROJO = OXÍGENO.



regiones la gravedad (que siempre es una fuerza atractiva y trata de contraer las cosas) había logrado contrarrestar la expansión y se comenzaron a condensar las primeras estrellas. Nuestra vida diaria está regulada por moléculas, muchas de ellas muy sencillas, constituidas por sólo dos átomos. Ejemplos de estas moléculas sencillas son el nitrógeno molecular ( $N_2$ ) y el oxígeno molecular ( $O_2$ ), que forman predominantemente el aire que respiramos. También formado por dos átomos (o diatómico, como se le conoce más técnicamente) es el fluoruro de hidrógeno (HF), de amplio uso industrial en la fabricación de medicamentos (Prozac) y de materiales (teflón). Es también fácil dar ejemplos de moléculas familiares con tres (agua =  $H_2O$ ), cuatro (amoníaco =  $NH_3$ ), o cinco (metano =  $CH_4$ ) átomos. Pero hay moléculas importantes para nosotros formadas por un gran número de átomos. La hemoglobina, la molécula que transporta el oxígeno en la sangre, tiene alrededor de 9 mil átomos. Mis moléculas preferidas son la cafeína, el componente estimulante del café, que modestamente tiene 24 átomos (10 de hidrógeno, 8 de carbono, 4 de nitrógeno y 2 de oxígeno; figura 2) y la capsaicina, que le da picor a los chiles, que cuenta con 49 átomos (27 de hidrógeno, 18 de carbono, 1 de nitrógeno y 3 de oxígeno; figura 2). En estas representaciones de estas moléculas orgánicas (o sea, que contienen carbono) podemos ver cómo este átomo (indicado con bolitas negras en la figura 2) forma una “espinas dorsal” alrededor de la cual se pegan los otros átomos. Esto se debe a que el carbono cuenta con cuatro enlaces disponibles (o sea cuatro posibilidades para combinarse con otros átomos, incluido otro carbono) y que al asociarse a otro átomo puede hacerlo usando uno, dos

o tres de sus enlaces disponibles. El carbono es uno de los pocos elementos que puede formar largas cadenas a partir de puros átomos de él mismo (comparte esta característica, llamada concatenación, con el silicio y algunos otros átomos).

Entonces, si bien en nuestro entorno terrestre inmediato las moléculas son muy comunes, nos podemos preguntar si fuera de la Tierra también son abundantes.

## LA ERA DEL PESIMISMO

Hasta hace sólo unas décadas se pensaba que las moléculas sólo existían en la Tierra y en algunos de los otros cuerpos de nuestro sistema solar. Nuestro sistema solar está constituido por una estrella, el Sol, ocho planetas y una diversidad de cuerpos menores que incluyen planetas enanos (categoría en la que reubicamos a Plutón), asteroides y cometas. La superficie y el interior del Sol son demasiado calientes para que existan moléculas. Las moléculas son relativamente delicadas y se rompen (técnicamente, se dice que se disocian) en sus átomos constituyentes a temperaturas mayores que unos pocos miles de grados Kelvin. Nuestro Sol tiene una temperatura superficial de aproximadamente 5 mil 800 grados Kelvin y sólo sobreviven en ella cantidades insignificantes de moléculas que son continuamente formadas por procesos químicos y disociadas (rotas) casi de inmediato, de modo que se alcanza una situación de equilibrio con muy pocas moléculas presentes. El interior de las estrellas es muchísimo más caliente que su superficie y ahí definitivamente no esperamos moléculas. Sin embargo, las estrellas más frías conocidas (llamadas estrellas tipo M) tienen una temperatura superficial de alrededor de 3 mil grados Kelvin y contienen proporciones más altas de moléculas. Los planetas de nuestro sistema solar tienen temperaturas promedio que van de las decenas a los cientos de grados Kelvin y ahí las moléculas son comunes.

Pero la pregunta sobre la existencia de moléculas fuera de nuestro sistema solar se fue centrando en si ellas existían en los vastos espacios que hay entre las estrellas, lo que los astrónomos llamamos el medio interestelar. Ahí las temperaturas pueden ser bajas, entre algunos grados Kelvin y algunas decenas de grados Kelvin, lo cual parecería sugerir que, si se formasen, las moléculas podrían sobrevivir.

Pero otras de las características del medio interestelar eran poco propicias para la formación de moléculas. Si bien las temperaturas no son altas en todo el espacio, las regiones cercanas a las estrellas están bañadas de radiación visible y ultravioleta producida por éstas. Esta radiación disocia a las moléculas, regresándolas a los átomos que las forman. Éste era un primer problema. Un problema adicional es que aun cuando dos átomos colisionasen para formar una molécula, el proceso de asociación generalmente produce energía (es exotérmico) y esta energía vuelve a romper a la molécula. Dicha situación es similar a tratar de que se peguen

dos pelotas elásticas: si las hacemos colisionar quedan pegadas una fracción de segundo pero la misma energía que se empleó en comprimir las hace rebotar y separarse de nuevo.

Este pesimismo se vio, en un principio, apoyado por la evidencia observacional. Los astrónomos pueden estudiar con sus telescopios e instrumentos la composición química del gas interestelar. Por ejemplo, uno puede observar la luz de una estrella lejana y estudiar el efecto de absorción del gas interestelar (que existe entre nosotros y la estrella) en su espectro. Durante la mayor parte del siglo xx este tipo de estudios indicaron que el gas ahí presente estaba predominantemente en forma atómica. Alrededor de 1940 se encontraron, en la línea de visión hacia algunas estrellas, trazas de dos moléculas diatómicas muy sencillas:  $CH$  (y su forma una vez ionizada,  $CH^+$ ) y  $CN$ . Pero nada más. La ciencia de la astronomía molecular no parecía tener mucho futuro. Se dice que cuando en 1960 un eminente astrónomo observacional le preguntó a un igualmente eminente astrónomo teórico si valía la pena construir un radiotelescopio para buscar la emisión de moléculas en el espacio, éste le contestó que no perdiera el tiempo. Afortunadamente, el astrónomo observacional decidió no seguir el consejo.

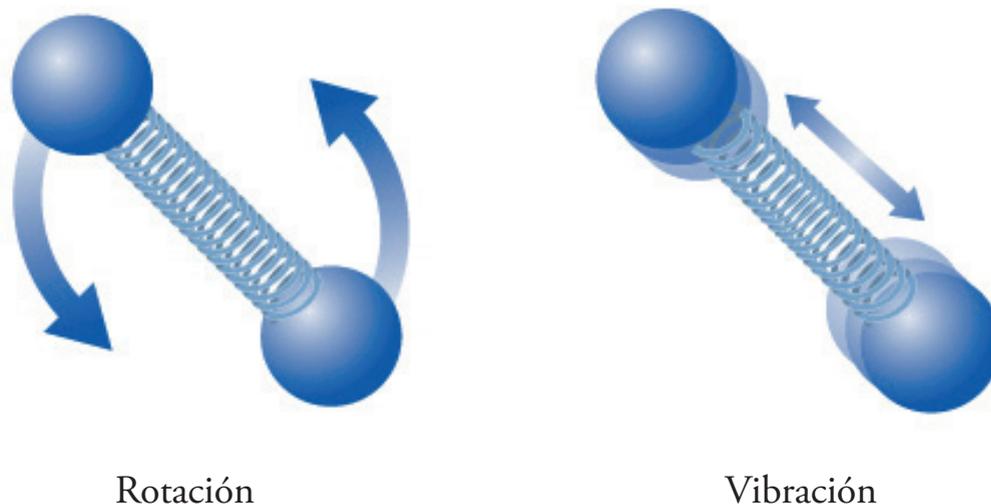
#### SE COMIENZAN A DESCUBRIR MUCHAS MOLÉCULAS

Como ha ocurrido muchas veces en la astronomía, esta situación de estancamiento se debía a dos problemas, uno observacional y el otro teórico. El problema observacional radicaba en que las moléculas emiten energía a frecuencias muy específicas para cada una de ellas, pero estas emisiones ocurren típicamente a las frecuencias de radio (frecuencias mucho más bajas que las de la luz pero más altas que las que se usan en la radiodifusión o la televisión). Por ejemplo, el vapor de agua tiene una emisión característica a 22 mil 235.080 MHz, mientras que Radio UNAM transmite en la ciudad de México a 96.1 MHz (1 MHz es igual a un millón de Hertz o sea un millón de oscilaciones por segundo). Las moléculas tienen tres mecanismos principales para producir (o absorber) radiación. Estos mecanismos dan origen a las transiciones (cambios de energía) electrónicas, vibracionales y rotacionales. Las transiciones electrónicas son similares a las de los átomos, en las que un electrón se aleja o se acerca al núcleo. Las energías de este tipo de transiciones caen en la parte óptica del espectro electromagnético. En cambio, las transiciones vibracionales y rotacionales son exclusivas de las moléculas (véase figura 3). Las transiciones vibracionales caen en el infrarrojo y las rotacionales, las más fáciles de producir, en las ondas de radio.

Iba a ser muy difícil detectar moléculas en la parte visible del espectro electromagnético (había que “sintonizar” a las frecuencias correctas, o sea, las de

radio) y hubo que esperar hasta la década de 1960 para que con el desarrollo de la radioastronomía quedara claro que hay moléculas, y muchas, en el espacio entre las estrellas.

Figura 3.  
TRANSICIONES ROTACIONAL (IZQUIERDA) Y VIBRACIONAL (DERECHA) DE UNA MOLÉCULA DIATÓMICA. PODEMOS PENSAR EN ESTAS MOLÉCULAS COMO DOS BOLAS (LOS DOS ÁTOMOS QUE LA FORMAN) UNIDAS POR UN RESORTE.



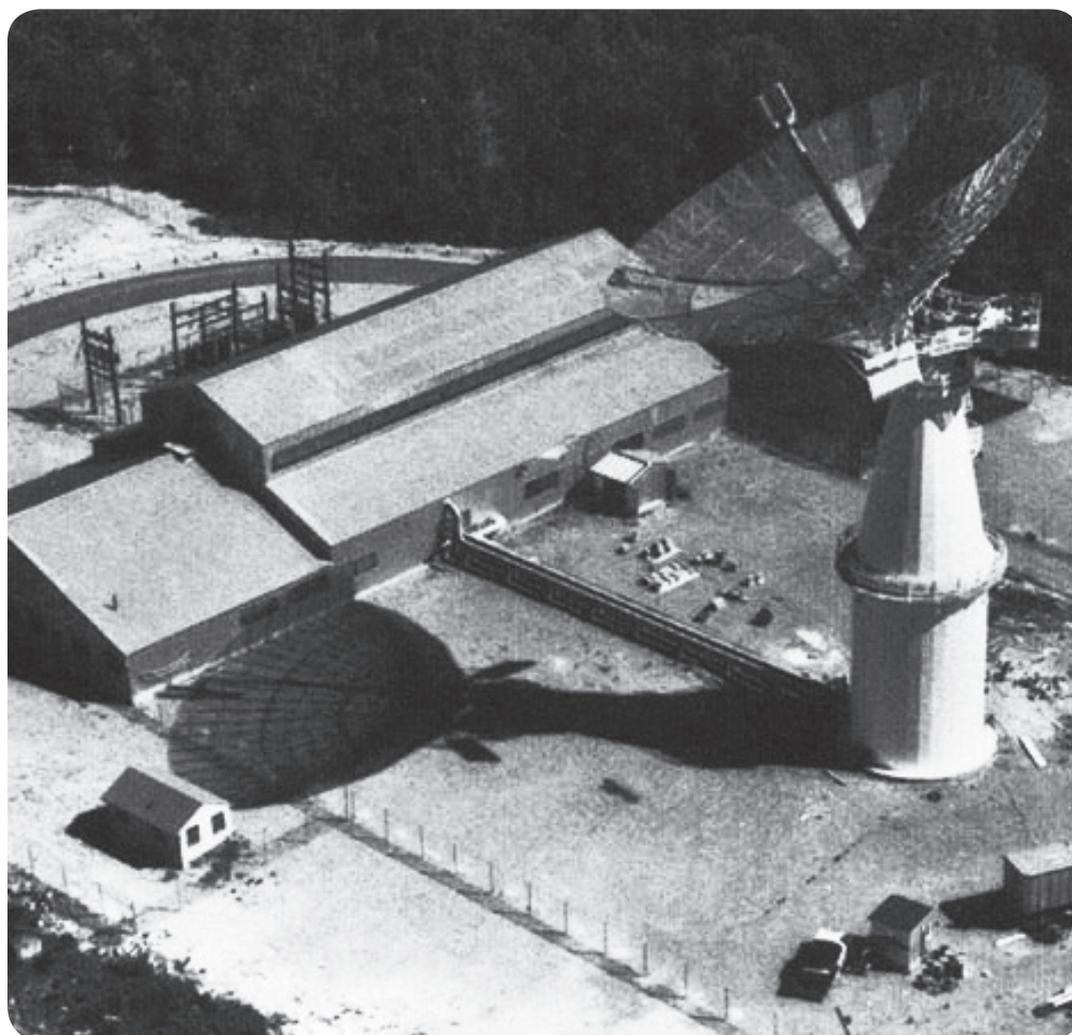
A partir de la década de 1960 se realizó la detección de varias moléculas, por grupos muy ilustres de investigadores. En 1963 se detectó el hidroxilo ( $OH$ ) usando un radiotelescopio de 26 metros de diámetro (figura 4). Cinco años después, en 1968 un equipo encabezado por Charles Townes, Premio Nobel de Física de 1964, sacudió al mundo astronómico al reportar la detección de las primeras moléculas poliatómicas (más de dos átomos) en el medio interestelar: amoníaco ( $NH_3$ ) y agua ( $H_2O$ ). Para el descubrimiento del amoníaco y del agua, Townes y colaboradores utilizaron un pequeño radiotelescopio de seis metros de diámetro. En 1970 un grupo que incluía a Robert Wilson y Arno Penzias (quienes en 1978 recibirían el Premio Nobel de Física por su descubrimiento de la radiación cósmica de fondo) reportaron la detección del monóxido de carbono ( $CO$ ) en el medio interestelar. Esta molécula, por su relativa gran abundancia y facilidad para emitir radiación, se convertiría en el caballito de batalla para el estudio de las nubes moleculares. Por supuesto, el monóxido de carbono es muy útil para el radioastrónomo, pero es letal en la vida diaria: si respiramos mucho de él se pega a la hemoglobina e impide que se transporte el vital oxígeno a la sangre.

El lector se preguntará por qué no observar directamente a la molécula de hidrógeno que es por mucho la más abundante en el espacio. Resulta que esta

molécula es simétrica y esto hace que no absorba o emita radiación de manera fácil. En contraste, la molécula del  $CO$  es asimétrica (el  $O$  es más pesado que el  $C$ , véase figura 5) y esto la hace absorber y emitir radiación eficientemente. A partir de esos años pioneros el número de moléculas conocidas en el medio interestelar y en el entorno de estrellas muy frías (el llamado medio circunestelar para distinguirlo del interestelar) ha crecido de manera continua, llegando a 209 en la actualidad (julio de 2015). Para una lista actualizada el lector interesado puede consultar [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_interstellar\\_and\\_circumstellar\\_molecules](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_interstellar_and_circumstellar_molecules)

Figura 4.

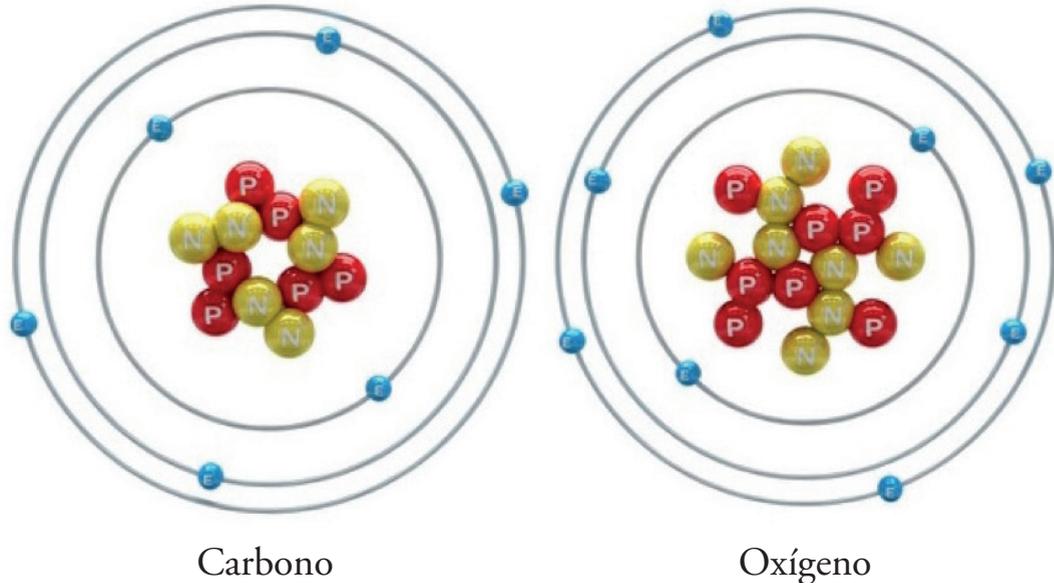
RADIOTELESCOPIO DE 26 METROS DE DIÁMETRO DEL OBSERVATORIO DE MILLSTONE HILL EN MASSACHUSETTS, ESTADOS UNIDOS, DONDE SE DETECTÓ POR PRIMERA VEZ LA MOLÉCULA DE HIDROXILO ( $OH$ ).



Cortesía del Massachusetts Institute of Technology.

Figura 5.

LOS ÁTOMOS DE CARBONO (C, IZQUIERDA) Y DE OXÍGENO (O, DERECHA). JUNTOS FORMAN LA MOLÉCULA DE CO. LOS PROTONES SE REPRESENTAN CON UNA P, LOS NEUTRONES CON UNA N Y LOS ELECTRONES CON UNA E. DEBIDO A QUE EL O (OCHO PROTONES MÁS OCHO NEUTRONES EN EL NÚCLEO) ES MÁS PESADO QUE EL C (SEIS PROTONES MÁS SEIS NEUTRONES EN EL NÚCLEO), LA MOLÉCULA ES ASIMÉTRICA, LO CUAL LE PERMITE INTERACCIONAR FUERTEMENTE CON LA RADIACIÓN.



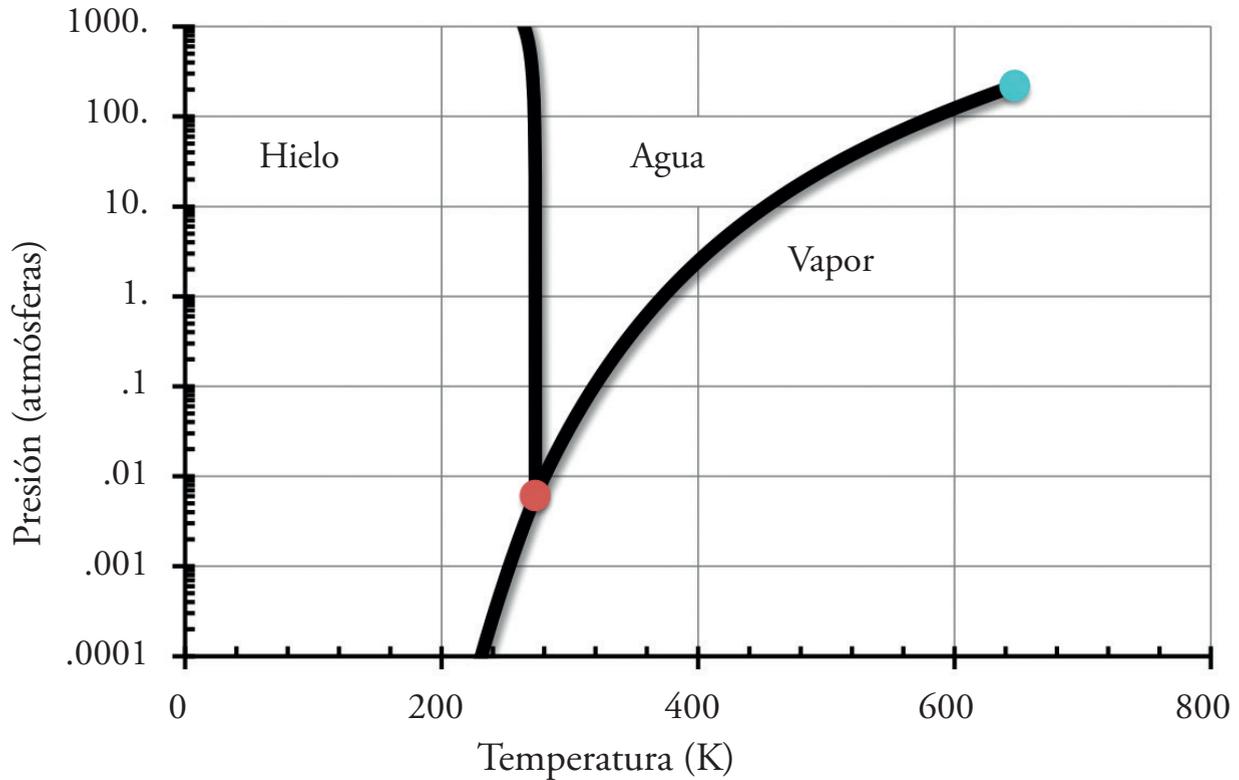
Todas estas moléculas se hallan en forma gaseosa o en forma de hielo en el espacio. ¿Y la forma líquida que en el caso del agua es indispensable para la vida? Resulta que en las condiciones de muy baja presión prevalentes en el medio interestelar, las sustancias pasan de hielo directamente a gas y viceversa, sin pasar por el estado líquido. O sea, que para tener agua líquida, no sólo se requiere una temperatura adecuada sino también una presión mínima. Esto lo podemos apreciar en el llamado diagrama de fase del agua<sup>3</sup> (figura 6).

Habíamos mencionado que la situación anterior de estancamiento tenía también un componente teórico. Y es que físicos y astrónomos teóricos muy destacados habían concluido que no debería de haber moléculas en el medio interestelar y habían desanimado a muchos astrónomos observacionales, como el de la anécdota, de siquiera intentar una búsqueda. ¿Dónde se habían equivocado los teóricos? Básicamente pensaban que el medio interestelar era muy tenue y expuesto a las radiaciones y que en él no habría regiones apropiadas para la existencia de

<sup>3</sup> En México nos referimos a éste como el diagrama de fase. En otros países se le llama diagrama de fases, que quizá es más apropiado porque son varias fases.

Figura 6.

DIAGRAMA DE FASE DEL AGUA. CUANDO ESTAMOS A UNA PRESIÓN DE UNA ATMÓSFERA (EJE VERTICAL) CONFORME VAMOS DE MÁS FRÍO A MÁS CALIENTE (O SEA, MOVIÉNDONOS DE IZQUIERDA A DERECHA), EL AGUA ESTÁ COMO HIELO, LUEGO COMO AGUA LÍQUIDA Y FINALMENTE COMO VAPOR. EN CONTRASTE, SI ESTAMOS A PRESIONES MUY BAJAS (POR DEBAJO DE 0.006 ATMÓSFERAS) EL AGUA PASA DE HIELO A VAPOR Y VICEVERSA, SIN PASAR POR EL ESTADO LÍQUIDO. EL PUNTO ROJO ES EL PUNTO TRIPLE, DONDE HIELO, AGUA LÍQUIDA Y VAPOR PUEDEN COEXISTIR. EL PUNTO AZUL ES EL PUNTO CRÍTICO, DONDE COEXISTEN EL AGUA LÍQUIDA Y EL VAPOR DE AGUA.



moléculas. Lo que estos investigadores no sospechaban es que en el medio interestelar existen unas regiones ahora conocidas como nubes oscuras (también llamadas nubes moleculares), las cuales proporcionan las condiciones para la formación y supervivencia de las moléculas (véase figura 7). Estas nubes son oscuras (por la presencia de polvo cósmico en ellas, que es opaco a la luz) y esto protege su interior de las destructivas radiaciones, tanto de fotones como de partículas, que existen en el medio interestelar normal. Los astrónomos les llamamos nubes porque nos recuerdan a las nubes atmosféricas, pero son objetos totalmente diferentes.<sup>4</sup> Pero ¿qué es el polvo cósmico y de dónde proviene? ¿Y cómo se forman las moléculas dentro de estas nubes?

<sup>4</sup> Las nubes del medio interestelar son billones ( $10^{12}$ ) de veces más grandes que las atmosféricas, pero muchísimo más tenues.

Figura 7.  
IMAGEN DE UNA NUBE MOLECULAR (TAMBIÉN CONOCIDAS COMO NUBES OSCURAS)  
EXISTENTE EN EL MEDIO INTERESTELAR.





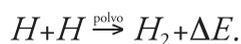
Cortesía de M. Lorenzi.

Además de átomos y moléculas, que tienen dimensiones diminutas, existen en el medio interestelar partículas de algo que los astrónomos llamamos polvo. Estas partículas tienen dimensiones de décimas de micra (una micra es una millonésima de metro) y están compuestas principalmente de grafitos (estructuras sólidas hechas de átomos de carbono) y silicatos (compuestos sólidos que contienen silicio y oxígeno, en particular el tetraedro  $\text{SiO}_4$ ). Los granos de polvo son mucho más masivos que cualquier molécula, conteniendo del orden de  $10^{10}$  átomos. Sólo 1% de la materia del medio interestelar está en los granos de polvo, pero su papel es crucial en lo que se refiere a las moléculas. No sólo las protegen<sup>5</sup> de la radiación ultravioleta, absorbiéndola y escudando a las moléculas, sino que es el polvo el que permite que se formen las moléculas más sencillas. Habíamos dicho que si dos átomos colisionaban para formar una molécula, la energía generada por el proceso volvía a romper la molécula. Hace falta un catalizador, algo que absorba esa energía sobrante antes de que rompa a la molécula. En la industria se usan frecuentemente catalizadores, que tienen el papel de ayudar a que los procesos químicos ocurran más rápidamente. En el espacio, es la superficie del polvo la que hace este papel de catalizador y permite la formación de la molécula más abundante en el medio interestelar, el hidrógeno molecular ( $\text{H}_2$ ).

El hidrógeno es el elemento químico más abundante en el universo. Si dos átomos de hidrógeno chocan en el espacio, se vuelven a separar de inmediato. Podemos representar esta situación mediante la reacción siguiente:



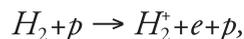
O sea, que no pasa nada. En cambio, si estos dos átomos de hidrógeno se pegan a la superficie de un grano de polvo, pueden desplazarse sobre esta superficie hasta juntarse. La energía producida por la asociación de los dos átomos es absorbida por el grano de polvo y la molécula recién formada se desprende al medio interestelar (véase figura 8). Esta reacción catalizada con la ayuda del polvo sería:



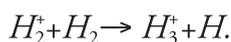
Una vez que se cuenta con el hidrógeno molecular, pueden ocurrir reacciones en la fase gaseosa (o sea, ya no en la superficie del polvo) que llevan a la formación de moléculas más complejas. En el espacio interestelar existen rayos

<sup>5</sup> Los astrónomos a veces hablamos de los componentes del espacio como si fueran seres vivos y tuvieran consciencia. El polvo no “decide” proteger a las moléculas. Simplemente sus características físicas son así.

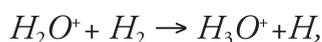
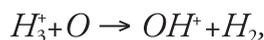
cósmicos, partículas cargadas que viajan a gran velocidad. Los rayos cósmicos son en su mayoría protones ( $p$ ). Entonces, un rayo cósmico puede chocar con una molécula de hidrógeno, arrancándole a esta última un electrón (lo que se conoce como una ionización). Esta reacción sería:



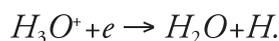
donde  $e$  representa al electrón arrancado de la molécula. La molécula de hidrógeno ionizada puede chocar con una molécula de hidrógeno neutra:



El ion molecular  $H_3^+$  es muy reactivo y lleva a la formación de muchas moléculas. Por ejemplo, el agua ( $H_2O$ ) se forma mediante la siguiente serie de reacciones:



y finalmente:



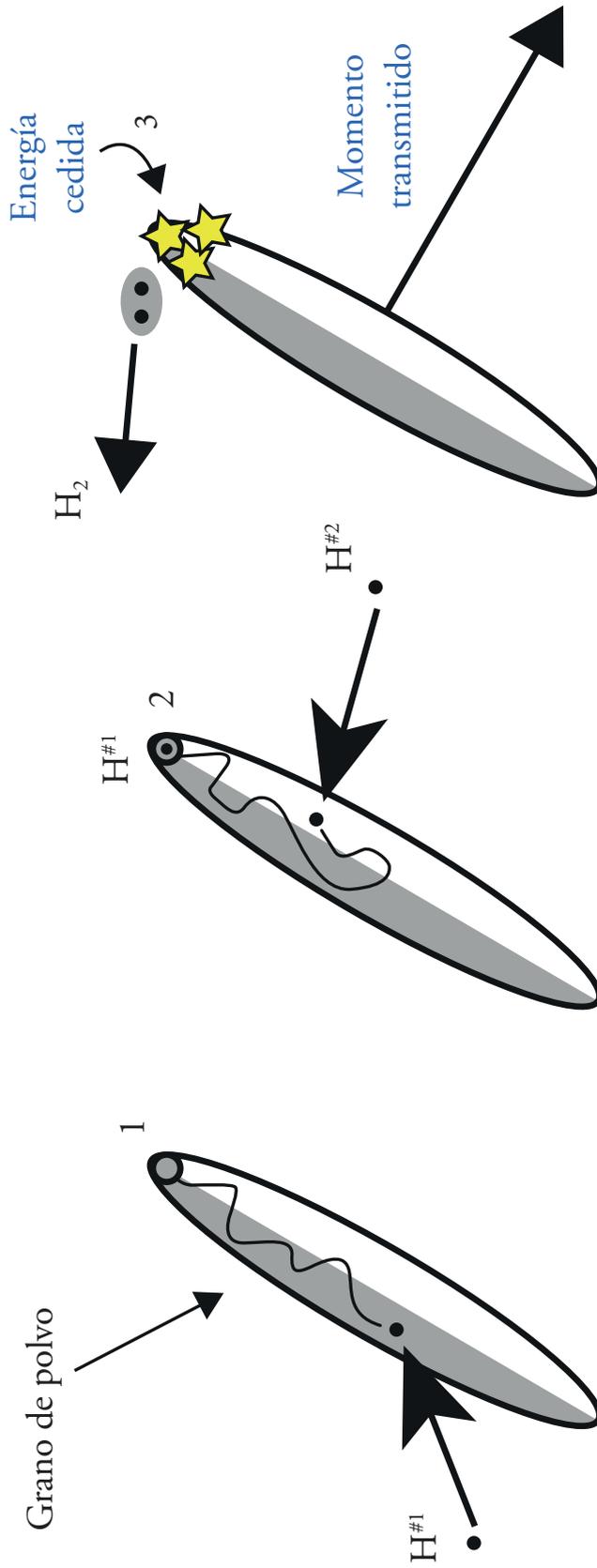
El lector se preguntará si hacen falta tantos pasos para llegar a formar el agua. Lo que ocurre es que en la fase gaseosa necesitamos que entren (y salgan) dos partículas de la reacción. Podríamos proponer que ya que tenemos el  $H_2O^+$  simplemente podríamos juntarlo con un electrón ( $e$ ), pero terminaríamos con una sola partícula ( $H_2O$ ) que se rompería en dos pedazos. Para conservar la energía y el momento durante la reacción, necesitamos que haya dos partículas como resultado para que los productos sean estables. Esta condición también se puede entender con conceptos termodinámicos. Si se empieza con dos partículas y se termina con una, el sistema se “ordena”. O sea, disminuye la entropía. Pero la Segunda Ley de la Termodinámica nos dice que la entropía siempre aumenta.

Es también importante aclarar que así como hay procesos de formación de moléculas los hay de destrucción de moléculas. Los investigadores en esta área tienen grandes programas de cómputo que calculan cientos de reacciones al mismo tiempo y que pueden predecir cuál es la composición relativa de las moléculas de las nubes oscuras como función del tiempo.

Figura 8.

ESQUEMA DE LA FORMACIÓN DE HIDRÓGENO MOLECULAR EN LA SUPERFICIE DE LOS GRANOS DE POLVO. (1) UN ÁTOMO DE HIDRÓGENO SE PEGA A LA SUPERFICIE DEL GRANO DE POLVO (REPRESENTADO POR LA ELIPSE GRANDE). (2) UN SEGUNDO ÁTOMO DE HIDRÓGENO SE PEGA A LA SUPERFICIE DEL GRANO DE POLVO. (3) AMBOS ÁTOMOS SE DESPLAZAN SOBRE LA SUPERFICIE DEL GRANO DE POLVO Y SI COINCIDEN, SE JUNTAN PARA FORMAR UNA MOLÉCULA DE HIDRÓGENO, LA CUAL SE DESPRENDE DEL GRANO Y PASA A FORMAR PARTE DEL MEDIO GASEOSO. LA ENERGÍA SOBRENANTE

SE PEGA A LA SUPERFICIE DEL GRANO DE POLVO. (3) AMBOS ÁTOMOS SE DESPLAZAN SOBRE LA SUPERFICIE DEL GRANO DE POLVO Y SI COINCIDEN, SE JUNTAN PARA FORMAR UNA MOLÉCULA DE HIDRÓGENO, LA CUAL SE DESPRENDE DEL GRANO Y PASA A FORMAR PARTE DEL MEDIO GASEOSO. LA ENERGÍA SOBRENANTE LA ABSORBE EL GRANO DE POLVO EN FORMA DE CALOR Y MOVIMIENTO.



Para terminar esta sección discutiremos brevemente dónde se forma el importante polvo. Muchas de las estrellas son demasiado calientes para que se forme polvo en ellas: la alta temperatura sublimaría al polvo en gases. Pero, como hicimos notar anteriormente, existen unas estrellas muy frías y grandes llamadas gigantes rojas (figura 9) que además están perdiendo gas al medio circundante a través de lo que se conoce como un viento estelar. Estos vientos son lo suficientemente densos y fríos para que se condensen en ellos los granos de polvo, que son muy resistentes y sobreviven a las condiciones del medio interestelar. También se forman en estos vientos diversas moléculas que pueden ser estudiadas en ondas de radio (véase figura 10).

Figura 9.

ESCALAS APROXIMADAS DEL SOL (IZQUIERDA) Y DE UNA ESTRELLA GIGANTE ROJA (DERECHA).

LAS ESTRELLAS SON MUY DIFERENTES, PERO EN REALIDAD SON DOS MANIFESTACIONES DEL MISMO OBJETO: NUESTRO SOL SE TRANSFORMARÁ EN UNA GIGANTE ROJA EN UNOS 5 MIL MILLONES DE AÑOS.

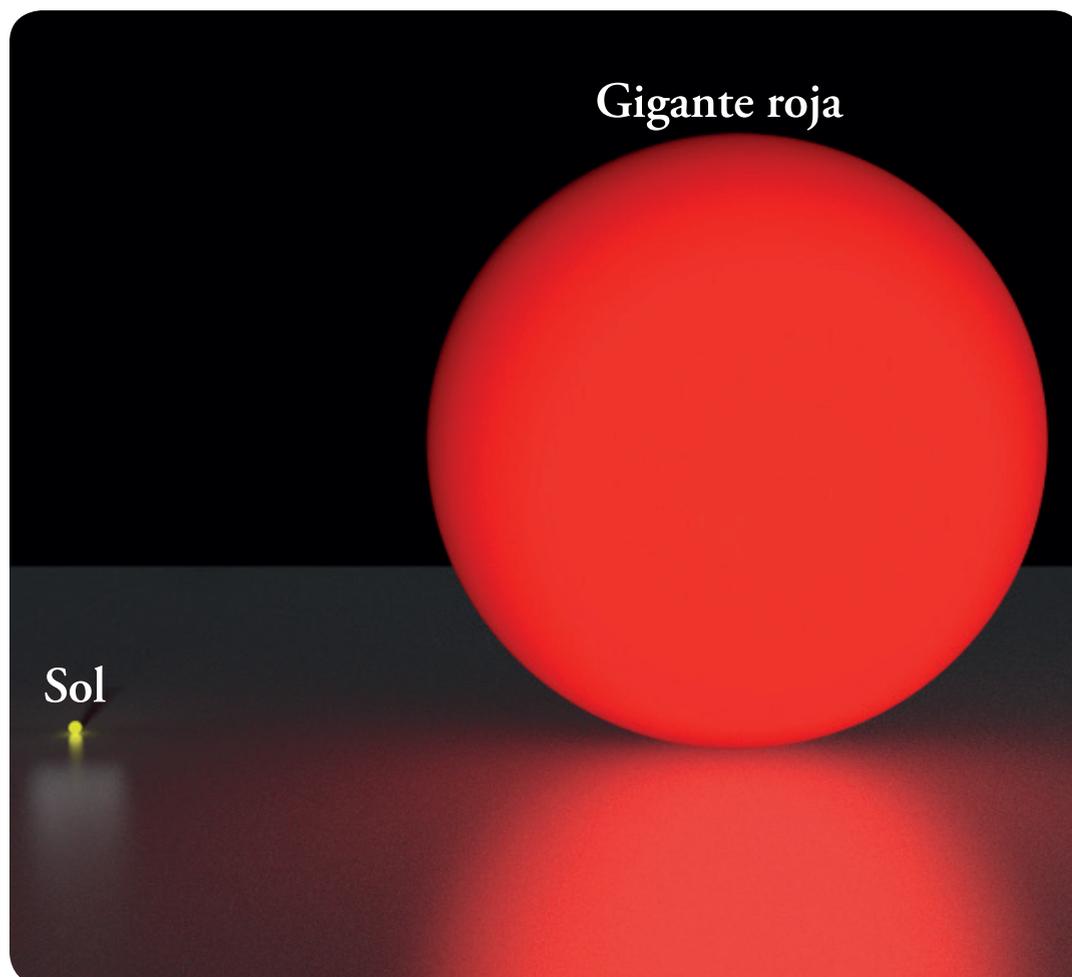
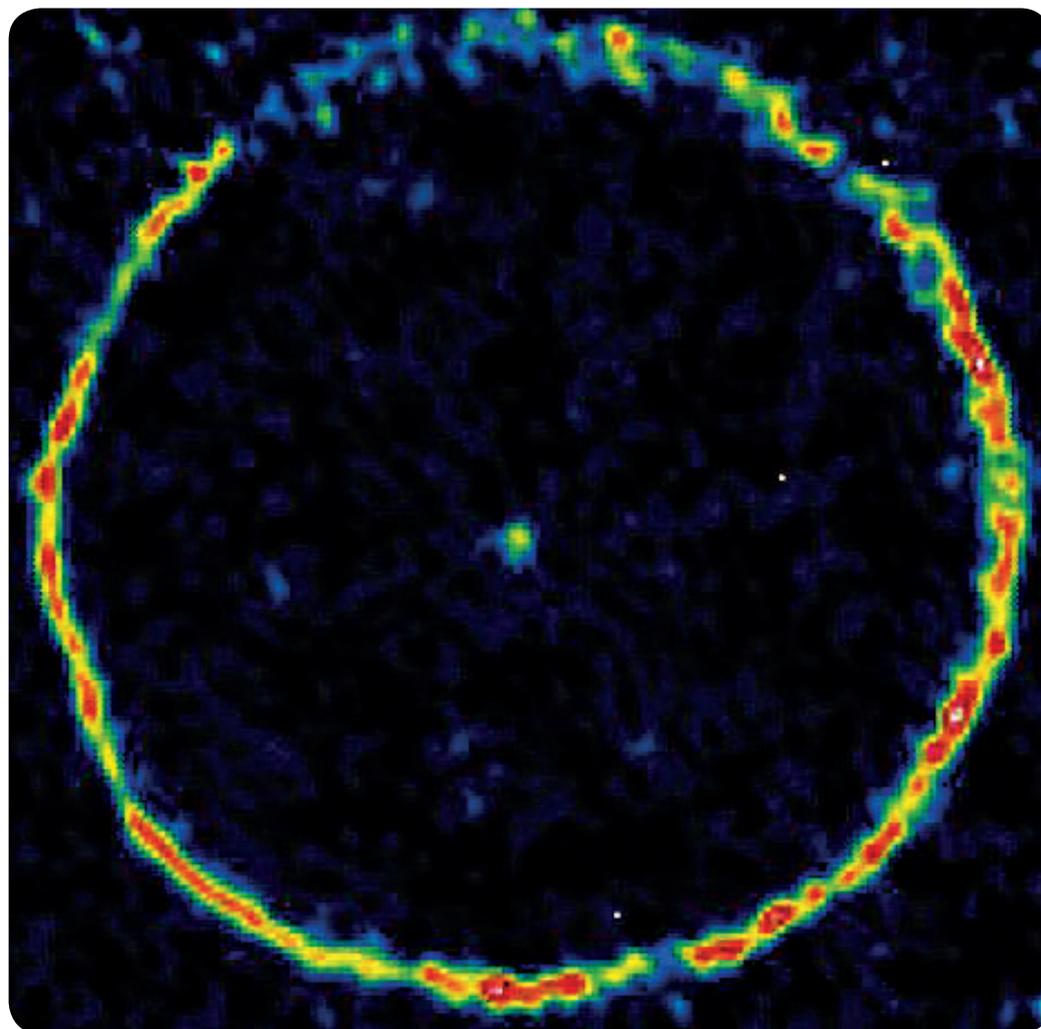


Figura 10.  
IMAGEN DE LA CÁSCARA DE LA EMISIÓN DEL MONÓXIDO DE CARBONO (CO) ALREDEDOR  
DE LA ESTRELLA EVOLUCIONADA TT CYG.



Cortesía de H. Olofsson.

### ¿Qué hemos aprendido de las moléculas?

Una vez que se comenzaron a descubrir moléculas, los astrónomos estuvieron en condiciones de comenzar a estudiar el medio frío y denso (astronómicamente hablando, porque algo con  $10^4$  partículas por  $\text{cm}^{-3}$  es denso astronómicamente, pero comparable con los mejores vacíos de laboratorios terrestres) donde ellas se encuentran. La manifestación más importante de este medio molecular son obviamente las llamadas nubes moleculares (véase figura 7), ya mencionadas anteriormente y que ahora veremos con un poco más de detalle. En el medio interestelar la gravedad trata de juntar y comprimir las cosas lo más que se puede. Pero otros

agentes como la presión del gas, el campo magnético y la turbulencia tratan de separarlas. A la larga estas fuerzas en competencia forman estructuras muy diversas. Las nubes moleculares tienen densidades de hidrógeno molecular que van de cientos a cientos de miles de moléculas por centímetro cúbico (son densas). El tamaño de estas nubes va de las décimas a los cientos de años-luz (son grandes) y sus temperaturas de unos cuantos grados Kelvin a unas decenas de grados Kelvin (son frías). Pero lo más interesante de estas nubes es que contienen mucho material gaseoso, que va desde unas veces hasta unos millones de veces la masa del Sol (son masivas). ¿Por qué es esto interesante? Porque es de este abundante gas del cual se están condensando ahora nuevas estrellas y planetas, mediante el mismo mecanismo por el cual se formó nuestro sistema solar hace 4 mil 600 millones de años. Hay quien, apropiadamente, se refiere a las nubes moleculares como las maternidades estelares. El estudio mediante las moléculas nos permite determinar las características anteriormente citadas de estas nubes y estudiar el proceso de la formación estelar y planetaria.

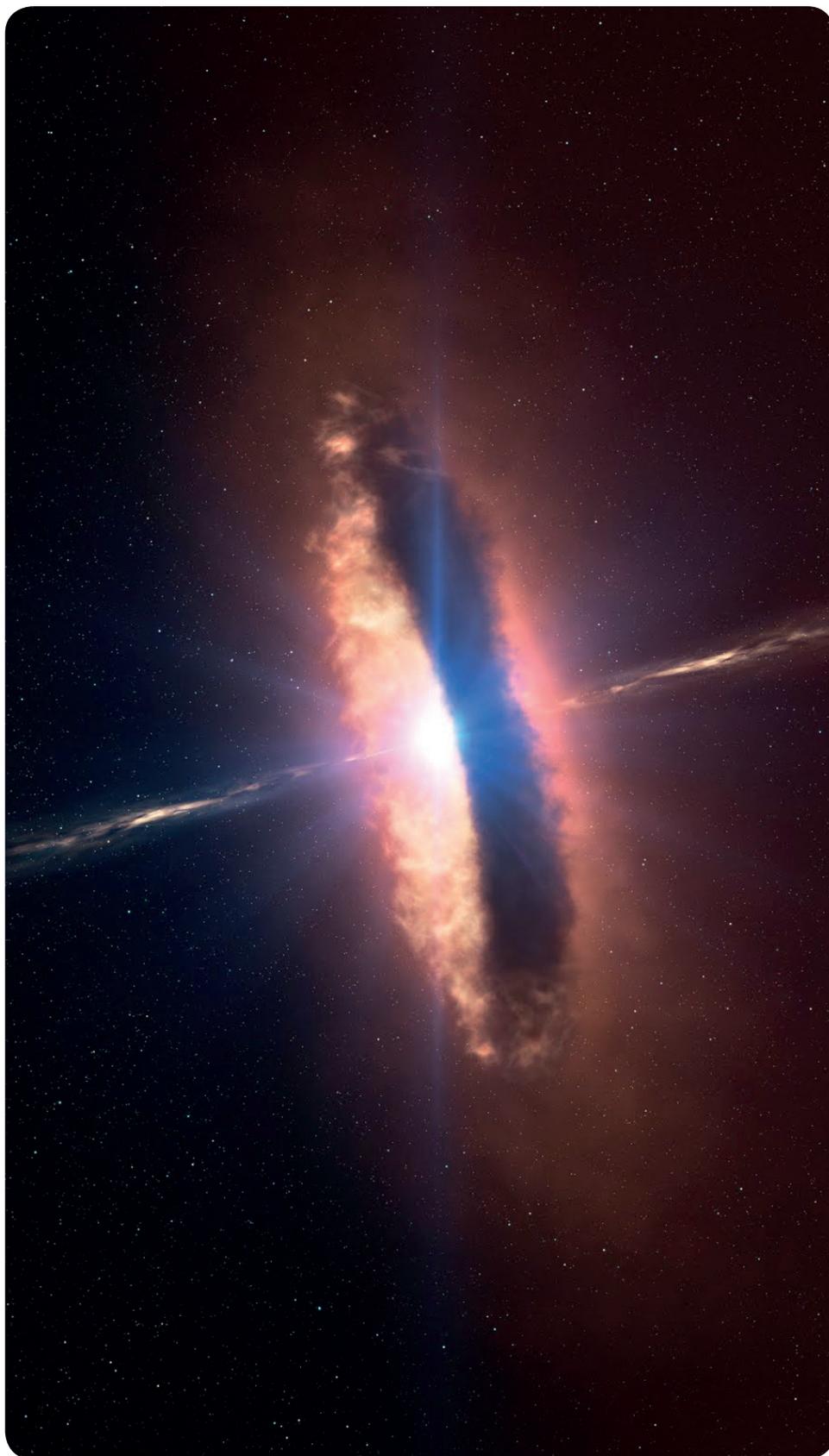
El proceso de la formación estelar dura tanto que no podemos estudiarlo durante nuestras cortas vidas. El astrónomo recurre entonces a estudiar distintas nubes, donde la formación estelar está en distintas etapas. Es como el cuento del extraterrestre que está en la Tierra sólo unas pocas horas y tiene que deducir cómo cambia un ser humano con la edad, tan sólo de ver a personas de distintas edades.

## La formación estelar

La formación de nuevos sistemas solares se inicia cuando un fragmento de una nube molecular comienza a contraerse por la fuerza de gravedad. No está claro qué produce esta pérdida de soporte contra la gravedad, que si parece estar presente en el resto de la nube molecular y la estabiliza. En el problema de la formación estelar tenemos que buscar un punto medio: si la formación de las nuevas estrellas fuera muy fácil, ya se habrían acabado todas las nubes moleculares, transformadas en estrellas. Si fuera muy difícil, nunca se formarían las estrellas (y sus planetas) y no estaríamos acá para discutir esto.

En la figura 11 presentamos una imagen que sintetiza los aspectos clave de la formación estelar. Una región más o menos esférica de gas se contrae por la fuerza de gravedad para formar una estrella. Pero debido a que este gas tiene rotación, el gas no cae directamente a la estrella sino a un disco (la estructura aplanada alrededor de la estrella). Ahí el gas cae rotando en espiral hacia la estrella, haciéndola crecer. Una parte del gas no cae a la estrella sino que es expulsado en chorros perpendiculares al disco (las dos estructuras lineales perpendiculares al disco en la figura 11). Estos chorros viajan por el espacio y producen fenómenos muy espectaculares, como los flujos moleculares (gas molecular arrastrado por los chorros)

Figura 11.  
DIAGRAMA ARTÍSTICO DE LA FORMACIÓN ESTELAR.



y los objetos Herbig-Haro (zonas de choque entre los chorros y el gas circundante). Los discos son sumamente importantes porque de ellos se forman los planetas (por eso se les llama también discos protoplanetarios). Gracias a las moléculas es ahora posible estudiar el tamaño y los movimientos de estos discos de los cuales se irán formando planetas (figura 12). También ha sido posible estudiar discos protoplanetarios que muestran brechas circulares, las cuales podrían estar indicando el inicio de la formación de nuevos planetas (véase figura 13).

Figura 12.

IMAGEN DE LA EMISIÓN DEL MONÓXIDO DE CARBONO EN EL DISCO PROTOPLANETARIO ALREDEDOR DE LA ESTRELLA TW DE LA CONSTELACIÓN DE LA HIDRA. EL DISCO ESTÁ EN ROTACIÓN Y EL GAS QUE SE ALEJA DE NOSOTROS APARECE EN TONOS ROJOS Y AMARILLOS, MIENTRAS QUE EL QUE SE ACERCA APARECE EN TONOS AZULES. LAS DIMENSIONES DE ESTOS DISCOS SON DEL ORDEN DE 100 VECES LA DISTANCIA SOL-TIERRA. IMAGEN OBTENIDA CON EL RADIOTELESCOPIO ALMA (POR LAS SIGLAS EN INGLÉS DE ATACAMA LARGE MILLIMETER ARRAY).

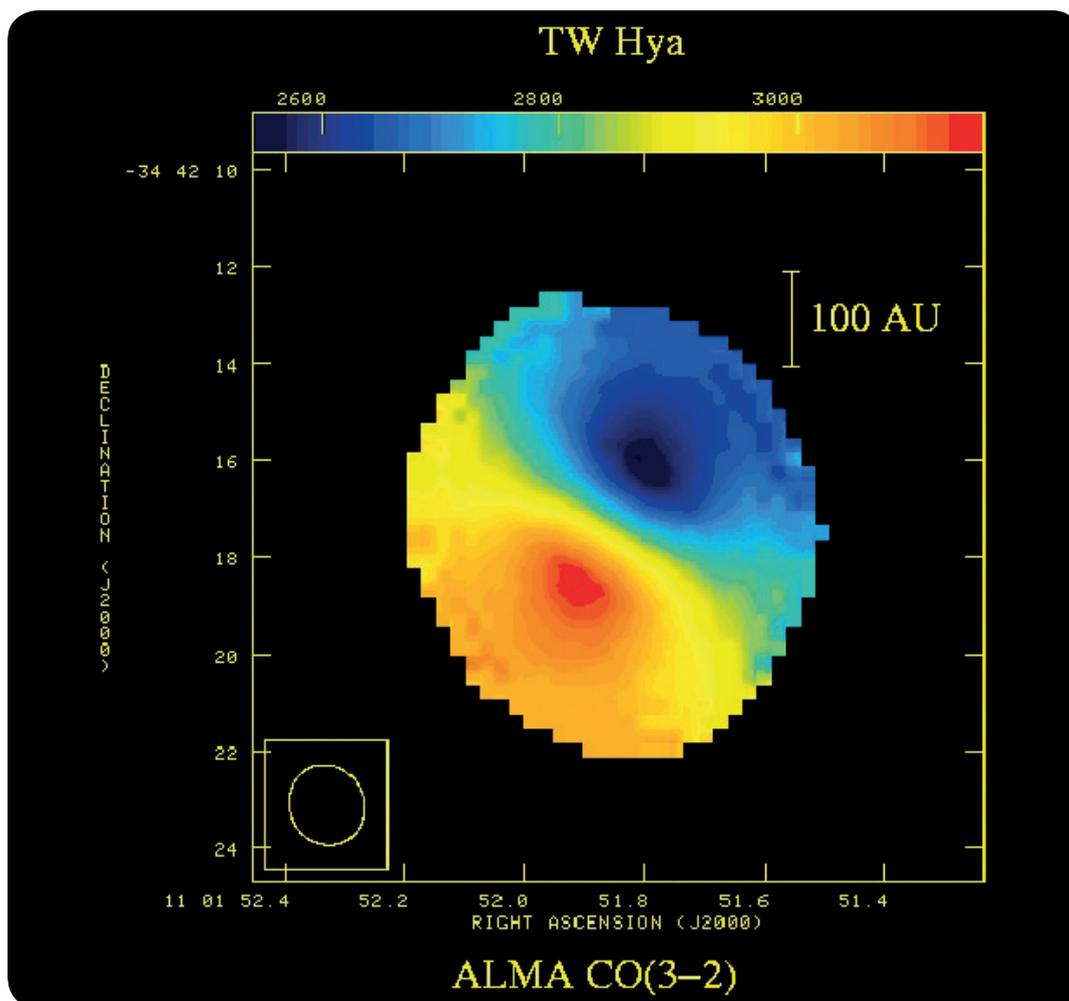
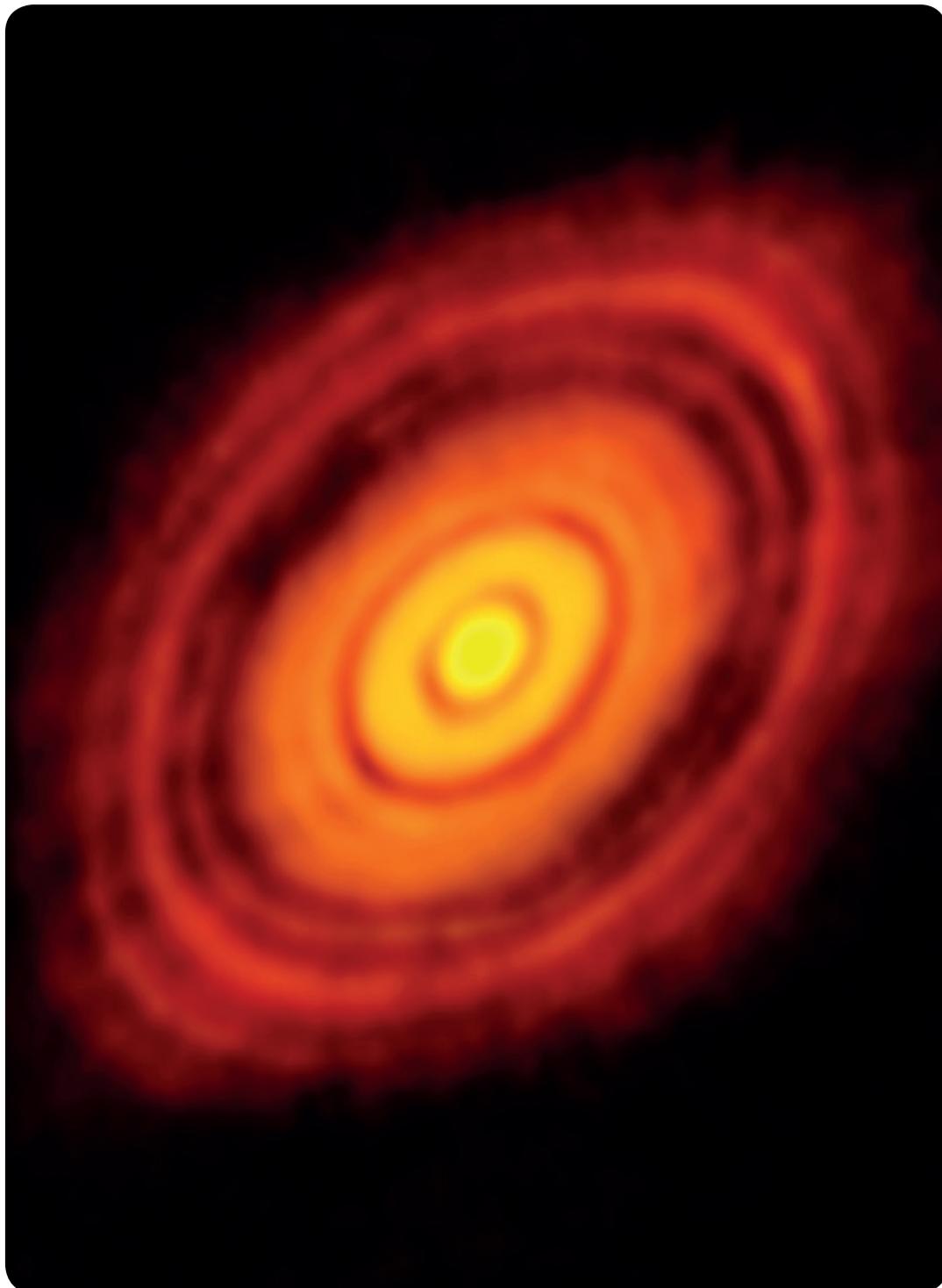


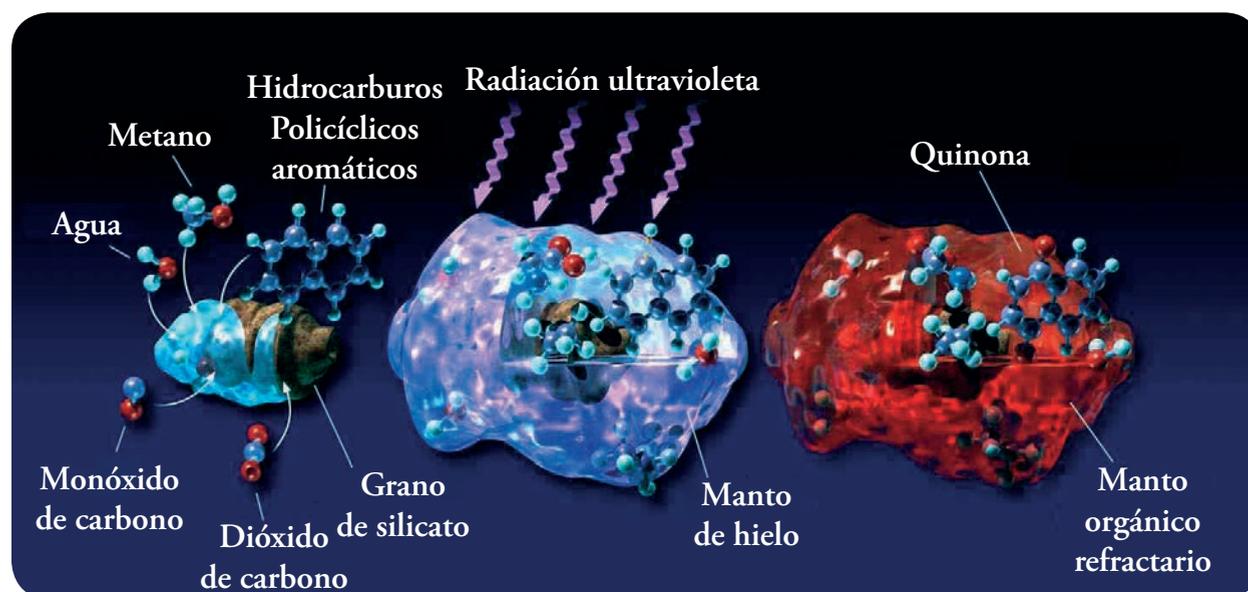
Figura 13.  
IMAGEN DE LA EMISIÓN DEL POLVO EN EL DISCO PROTOPLANETARIO ALREDEDOR  
DE LA ESTRELLA HL DE LA CONSTELACIÓN DEL TORO. SE CREE QUE LAS BRECHAS  
CIRCULARES QUE EXISTEN EN EL DISCO INDICAN LA FORMACIÓN DE NUEVOS  
PLANETAS. IMAGEN OBTENIDA CON EL RADIOTELESCOPIO ALMA.



En estas regiones de formación estelar se encuentran moléculas de considerable complejidad. Al parecer lo que ocurre es que son tan frías que alrededor de los granos de polvo se condensan mantos de hielo de agua, metano, monóxido de carbono y otras moléculas sencillas que pueden juntarse para formar moléculas más complejas. Cuando se forma una estrella en estas nubes, calienta a los granos de polvo evaporándoles sus mantos de hielo y estas complejas moléculas pasan a estar en estado gaseoso, estado en el cual pueden ser detectadas gracias a sus emisiones características en ondas de radio. Entonces, la formación de las nuevas estrellas ocurre en un medio gaseoso que es rico en moléculas complejas (figura 14). Es como si la naturaleza estuviera propiciando la formación de moléculas complejas en un lugar en el que van a ser necesitadas.

Figura 14.

(IZQUIERDA) LAS TEMPERATURAS EN LAS NUBES MOLECULARES SON LO SUFICIENTEMENTE BAJAS COMO PARA QUE MOLÉCULAS SENCILLAS COMO EL AGUA, EL METANO Y EL MONÓXIDO DE CARBONO SE DEPOSITEN COMO HIELOS EN LA SUPERFICIE DE LOS GRANOS DE POLVO HECHOS DE SILICATOS. (CENTRO) EN EL MANTO DE HIELO QUE SE FORMA LAS MOLÉCULAS SE COMBINAN PARA FORMAR MOLÉCULAS MÁS COMPLEJAS. DESPUÉS DE UN TIEMPO SE FORMAN EN LA NUBE NUEVAS ESTRELLAS QUE CALIENTAN A LOS GRANOS DE POLVO MEDIANTE SU RADIACIÓN ULTRAVIOLETA. (DERECHA) ESTAS MOLÉCULAS COMPLEJAS (COMO POR EJEMPLO LAS QUINONAS,  $C_6H_4O_2$ ) SE DESPRENDEN AL MEDIO CIRCUNDANTE Y PRODUCEN UNA QUÍMICA COMPLEJA EN LAS REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR.



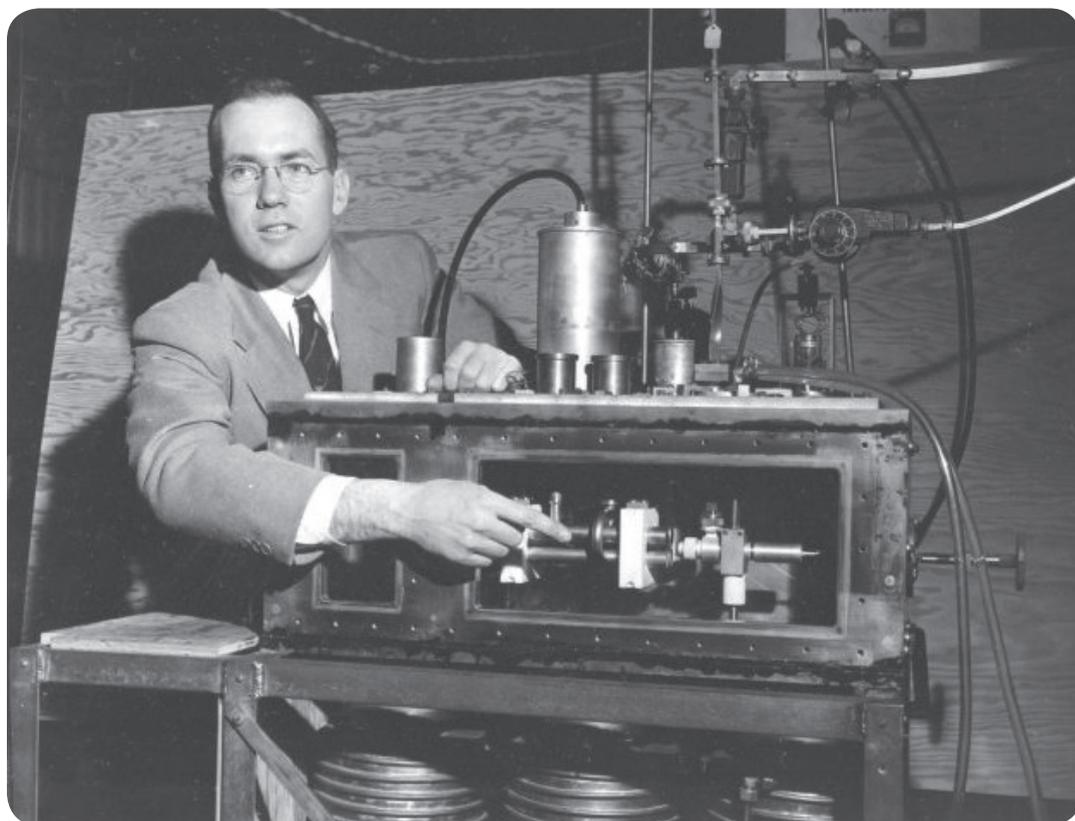
Cortesía de la NASA.

## Los máseres cósmicos

Otro descubrimiento muy importante relacionado con las moléculas fue el encontrar que algunas de ellas emiten en proceso máser (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* o Amplificación de Microondas por la Emisión Estimulada de Radiación). El mismo mecanismo que permite funcionar a los apuntadores láser está presente en el espacio interestelar desde hace mucho. En este proceso el gas, en lugar de quitarle fotones a la radiación que le llega, contribuye con más, produciendo emisión muy intensa que se puede ver a enormes distancias, aun astronómicamente hablando. Entre las moléculas que muestran emisión máser en algunas de sus transiciones están el vapor de agua, el hidroxilo,

Figura 15.

CHARLES TOWNES (1915-2015) COMPARTIÓ EL PREMIO NOBEL DE FÍSICA DE 1964 POR “SUS CONTRIBUCIONES FUNDAMENTALES EN ELECTRÓNICA CUÁNTICA QUE LLEVARON AL DESARROLLO DEL LÁSER Y DEL MÁSER”. INTERESANTEMENTE, TAMBIÉN ENCABEZÓ AL GRUPO DE LA UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA QUE DESCUBRIÓ LA EMISIÓN MÁSER DEL VAPOR DE AGUA EN EL ESPACIO INTERESTELAR.



Cortesía de The Associated Press.

el monóxido de silicio y el metanol. Por su gran brillo, los máseres moleculares permiten el estudio de zonas muy compactas, tanto en relación con la formación de las nuevas estrellas como en los envolventes de las estrellas frías. Charles Townes (figura 15) recibió el Premio Nobel de Física por demostrar que era posible construir en nuestra Tierra máseres y láseres, pero también encabezó al grupo que descubrió la emisión máser del vapor de agua en el espacio interestelar.

### La búsqueda de moléculas complejas

Con el tiempo se han ido descubriendo moléculas relativamente complejas en las nubes moleculares. Hasta recientemente, la molécula con más átomos descubierta era el  $HC_{11}N$ , una molécula de morfología lineal que tiene un átomo de hidrógeno en un extremo y uno de nitrógeno en el otro y en medio una cadena de 11 átomos de carbono (figura 16). Recientemente (2013) se ha reportado la detección de los fulerenos  $C_{60}$  y  $C_{70}$ . El  $C_{60}$  (véase figura 17) parece una pelota de fútbol o bien una cúpula geodésica, por lo que a veces se les llama buckminsterfullereno, en honor al famoso arquitecto diseñador de este tipo de estructuras. Una de las metas más ambicionadas por los astrónomos es la detección, en las regiones de formación estelar, de un aminoácido. Los aminoácidos son moléculas esenciales para la vida, puesto que forman a las proteínas y hay 20 de ellos que son considerados básicos. El aminoácido más sencillo es la glicina, con un total de sólo 10 átomos (5 de hidrógeno, 2 de carbono, 2 de oxígeno y 1 de nitrógeno; véase figura 18). En el año 2003 hubo gran excitación por el reporte de la detección de glicina por un grupo, pero a los dos años otro grupo demostró que el reporte era incorrecto. Hay, sin embargo, moléculas como el aminoacetonitrilo que han sido detectadas sin lugar a dudas en las nubes moleculares y que son muy cercanas a la glicina (véase figura 18). Por cierto, el aminoacetonitrilo se usa en la Tierra como plaguicida.

Es difícil decir que tanto avanza en el espacio interestelar la química que lleva a la vida. Aún más, la formación de una estrella y sus planetas es un evento violento que podría destruir a todas las moléculas presentes y que forzaría a que la química tenga que comenzar a partir de cero en el planeta recién formado.

Figura 16.

LA MOLÉCULA DE  $HC_{11}N$  ES LA QUE TIENE MÁS ÁTOMOS DE LAS DESCUBIERTAS HASTA 2013.  
TIENE 11 ÁTOMOS DE CARBONO (ESFERAS GRISES), UNO DE NITRÓGENO (ESFERA AZUL)  
Y UNO DE HIDRÓGENO (ESFERA BLANCA).



Figura 17.

LA MOLÉCULA DE BUCKMINSTERFULLERENO,  $C_{60}$ . CADA ESFERITA REPRESENTA A UN ÁTOMO DE CARBONO.

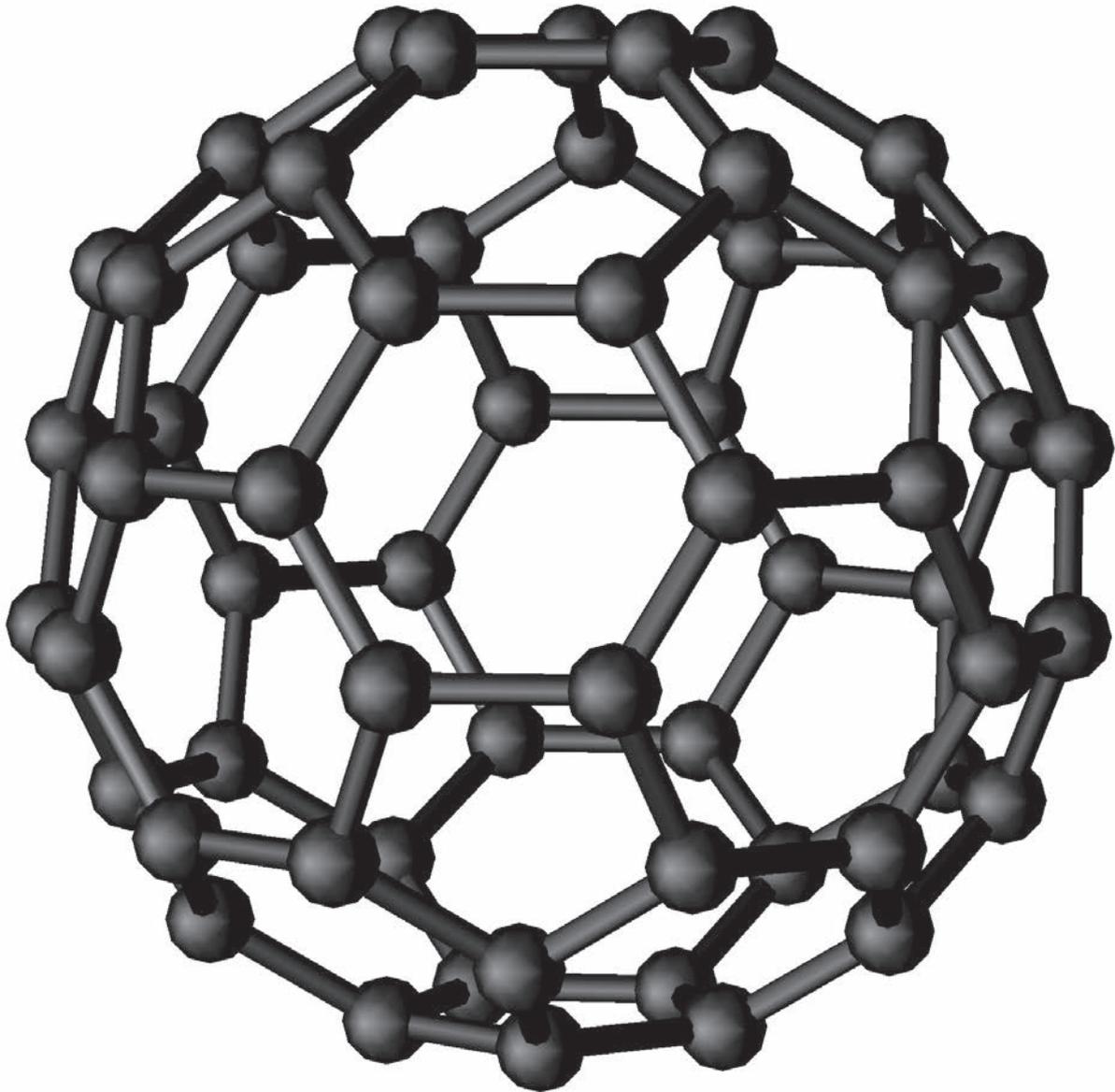
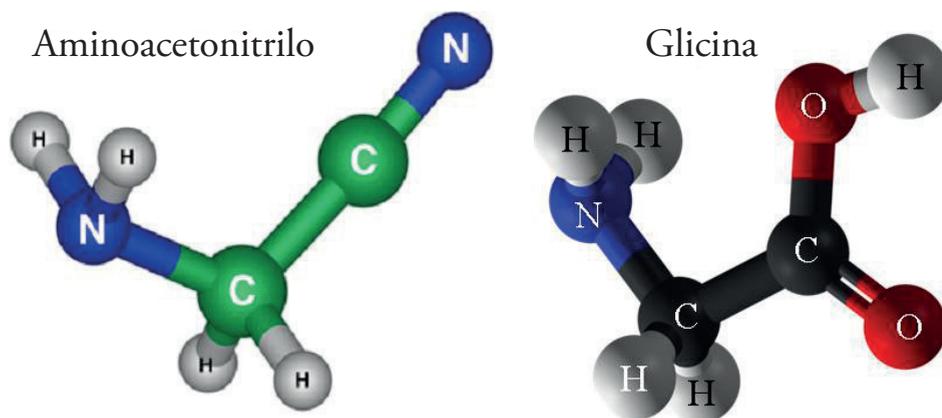


Figura 18.

LAS MOLÉCULAS DE AMINOACETONITRILO (IZQUIERDA) Y DE GLICINA (DERECHA).  
LA PRIMERA HA SIDO DETECTADA SIN LUGAR A DUDAS EN LAS NUBES  
MOLECULARES. LA SEGUNDA, BASTANTE SIMILAR A LA PRIMERA,  
ES EL MÁS SENCILLO DE LOS AMINOÁCIDOS Y PERMANECE  
AÚN SIN SER DETECTADA ASTRONÓMICAMENTE.



## CONCLUSIONES

Las moléculas sirven para estudiar medios fríos, o cuando menos no muy calientes (porque si es muy caliente el medio, se destruyen). Otra área que se estudia, además de las nubes oscuras, mediante emisiones moleculares, son los vientos de las gigantes rojas, donde no sólo hay polvo sino también moléculas. Estas estrellas se hallan al final de su vida. O sea, que esperamos ver moléculas relacionadas con las etapas muy iniciales y muy terminales de la vida de las estrellas. Metafóricamente podemos decir que las moléculas en las estrellas son como la falta de cabello en los hombres: esta característica está presente cuando uno es muy joven y cuando uno es muy viejo.

Habíamos dicho que los átomos equivalen a las letras del alfabeto (que son sólo 27) y las moléculas a las palabras (que son un número mucho más grande). Podríamos extrapolar esta metáfora para decir que la vida es como la poesía: una combinación de moléculas (las palabras) que presentan un comportamiento impredeciblemente mucho más complejo que las partes que las componen (las letras). Qué tanto de esta química prebiótica que hemos discutido ocurre en el espacio entre las estrellas, como presagiando la vida, es un tema de investigación abierto.

## AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Joan Enrique Romero sus valiosos comentarios.

## REFERENCIAS

- Juaristi, E., M. Peimbert Sierra y L. F. Rodríguez Jorge, *La química y el universo*, El Colegio Nacional, México, 2012.
- Martín-Pintado, J., “La química del universo y el origen de la vida”, *Información y Actualidad Astronómica*, 25, 2008.
- Poveda, A., L. F. Rodríguez y M. Peimbert Sierra (comps.), *Siete problemas de la astronomía contemporánea*, El Colegio Nacional, México, 2004.
- Rodríguez, L. F., “La formación de las estrellas a través del tiempo”, *Saberes Compartidos*, 2, 2008: 11-20.
- Rodríguez, L. F. y Y. Gómez, “Agua en el cosmos”, *Scientific American Latinoamérica*, año 2, 6, 2003: 78-83.
- Thaddeus, P., “The prebiotic molecules observed in the interstellar gas”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 361, 2003: 1681-1687.
- Townes, Ch. H., “The discovery of interstellar water vapor and ammonia at the hat creek radio observatory”, *Physics*, 356, 2006: 81-84.
- Weinberg, S., *Los tres primeros minutos del universo*, Alianza Editorial, Madrid, 2009.

De manera general se recomiendan los títulos de astronomía que han salido en la colección La Ciencia para Todos del Fondo de Cultura Económica.

## CRÉDITOS DE IMÁGENES

- P. 5, © El Colegio Nacional/Gerardo Márquez Lemus.
- P. 59, © Carmen Sedano/Alamy, © Latinstock, © Depositphotos.
- P. 60, © Depositphotos, © Corbis. All Rights Reserved.
- P. 61, © Depositphotos.
- P. 62, © Depositphotos, © Paul Rapson/Alamy.
- P. 63, © Corbis. All Rights Reserved, © Glenn Paulina/TRANSTOCK, © Depositphotos.
- P. 65, © Corbis. All Rights Reserved, © Depositphotos, © Mervyn Rees/Alamy.
- P. 66, © Kevin Britland/Alamy, © Corbis. All Rights Reserved, © Editorial Image, LLC/Alamy.
- P. 67, © Corbis. All Rights Reserved, © Latinstock.
- P. 68, © US Army/Photo Researchers, Inc. © Depositphotos.
- P. 69, © Corbis. All Rights Reserved, © Depositphotos.
- P. 70 © Corbis. All Rights Reserved, © Depositphotos.
- P. 71, © Depositphotos.
- P. 72, © Corbis. All Rights Reserved, © Courtesy of Merck & Co., Inc., Whitehouse Station, New Jersey, © molekuul.be/Alamy, © Milos Luzanin/Alamy.
- P. 73, © Will McIntyre/Photo Researchers, Inc., © Depositphotos.
- P. 74, © Corbis. All Rights Reserved, © Martin Valigursky/Alamy, © Photo Researchers, Inc., © Depositphotos.
- P. 75, © Sebastian Kaulitki/Alamy, © Corbis. All Rights Reserved.
- P. 76, © Corbis. All Rights Reserved.
- P. 77, © Corbis. All Rights Reserved, © Public Domain.
- P. 78, © Corbis. All Rights Reserved, © Universal Images Group Limited/Alamy.
- P. 79, © Jochen Tack/Alamy, © Corbis. All Rights Reserved, © ONOKY-Photononstop/Alamy, © Por Jason Hollinger. (Pacific Yew.) [CC BY 2.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/2.0>).]

- P. 80, © Depositphotos, © Corbis. All Rights Reserved, © Por Wikip2011. (Trabajo propio.) [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>).]
- P. 82, © Depositphotos.
- P. 83, © Marvin Dembinsky Photo Associates/Alamy, © Depositphotos.
- P. 84, © Richard Levine/Alamy, © Corbis. All Rights Reserved.
- P. 85, © Simon Belcher/Alamy, © Depositphotos, © Corbis. All Rights Reserved.
- P. 86, © Depositphotos.
- P. 88, © Public Domain.
- P. 90, © Public Domain Por Sailko. (Trabajo propio.) [CC BY 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>).]
- P. 91, © Public Domain.
- P. 94, © Public Domain.
- P. 96, © Public Domain.
- P. 99, © Public Domain.
- P. 135, © Public Domain.
- P. 136, © Public Domain.
- P. 139, © Public Domain.
- P. 141, © Public Domain.
- P. 143, © Public Domain.
- P. 144, © Public Domain.
- P. 145, © Public Domain.
- P. 147, © Public Domain.
- P. 148, © Public Domain.

*La química: el funcionamiento del universo, los seres vivos y las actividades humanas* se terminó de imprimir y encuadernar el 17 de noviembre de 2015 en Hemes Impresores, Cerrada Tonantzin 6, Col. Tlaxpana, Deleg. Miguel Hidalgo, C. P. 11370, México, D. F. En su composición se usó tipo Garamond Pro 9:11, 10:13, 11:12 y 13:16 puntos. La edición consta de 500 ejemplares. Dirección editorial: Alejandro Cruz Atienza. Coordinación editorial: María Elena Ávila Urbina. Corrección: Alejandra Ruiz Díaz y Jorge Sánchez y Gándara. Composición tipográfica y diseño de portada: Sandra Gina Castañeda Flores.

