

La química del mar

Leticia Rosales Hoz*

¿Por qué el planeta Tierra es tan especial?

Debido a la existencia de los océanos, el planeta Tierra es único en nuestro sistema solar. A ellos debemos nuestro origen y nuestra subsistencia, sin ellos la Tierra sería un lugar muy diferente y no estaríamos los humanos aquí para estudiarla.

El exterior de nuestro planeta contiene una capa fluida llamada hidrosfera, de la cual 0.5% son aguas subterráneas, 0.04% son ríos y lagos, así que prácticamente toda el agua está contenida en los océanos. Vista desde el exterior, 71% de la Tierra está cubierta por océanos y sólo 29% corresponde a los continentes. El color azul distintivo de la Tierra desde el espacio se debe a la capa delgada constituida por los océanos y la atmósfera.

¿Por qué estudiar la química del mar?

La atención hacia la química de los océanos es importante, dado el aumento de flujos de sustancias químicas hacia el mar y su impacto en nuestro planeta.

Las descargas de nutrientes procedentes de plantas de tratamiento de aguas municipales, o las descargas agrícolas con altos contenidos de amonio, nitratos y fosfatos, han producido en ciertas áreas un aumento desmesurado de la producción de plantas marinas, proceso conocido como eutroficación, el cual se asocia con la producción de fitoplancton tóxico causante de las mareas rojas, lo que ocasiona una mayor demanda de oxígeno en las aguas subsuperficiales. La disminución o desaparición de oxígeno del agua produce un impacto negativo en las diversas comunidades biológicas.

En una escala global, el flujo de sustancias químicas a través del océano está ligado al clima del planeta. El océano contiene 60 veces más carbono inorgánico que la atmósfera, y las perturbaciones del CO₂ en el océano se asocian con cambios en la atmósfera. El uso de combustibles fósiles desde 1850 ha aumentado considerablemente el CO₂ en la atmósfera, lo cual puede producir cambios climáticos mayores a los del último periodo glacial. Gran parte del CO₂ entra al océano, y sin embargo, la velocidad de absorción de éste en el agua de mar no se conoce bien. Actualmente, se desconoce la combinación de procesos que controla la velocidad con la cual el fitoplancton fija el CO₂ y lo convierte en carbono orgánico, a pesar de que este proceso biológico es uno de los más importantes en la distribución de sustancias químicas disueltas y particuladas en el océano.

¿De dónde vino el agua de los océanos?

Entre las rocas más antiguas que se conocen (3.8 miles de millones de años) se tienen estratos sedimentarios depositados por el agua, por lo que se sabe que el agua ya existía entonces. Se piensa que el agua se condensó del vapor producido durante las erupciones volcánicas que se presentaron en los primeros tiempos del planeta. Debido a que la actividad volcánica ha caracterizado a la Tierra, los océanos deben haber aumentado en volumen con el tiempo.

¿Cuál es la composición de agua de los océanos?

El agua de mar contiene alrededor de 3.5% en peso de sales disueltas. La medición del contenido de sales en el agua de mar se conoce como salinidad, y comúnmente se expresa en partes por mil en lugar de partes por cien. El agua de mar promedio tiene por lo tanto una salinidad de 35 partes por mil. Si esto parece poco, visualicemos qué pasa si evaporamos el agua de los océanos: el piso de estos quedaría cubierto en su totalidad por una capa de 56 m de espesor.

Los principales elementos que contribuyen a la salinidad del océano son: O, H, Cl, Na, Mg, S, Ca, K, Br, C, Sr, B, Si y F (Tabla 1); estos 14 elementos constituyen 99.9% de las sales en el agua de mar.

Sin embargo, el uso de instrumentos analíticos de alta precisión ha permitido detectar a la fecha, la presencia de la

Tabla 1. Concentración promedio de los principales iones en el agua de mar.

Ion	partes por mil en peso
Cloruro, Cl ⁻	18.980
Sulfato, SO ₄ ²⁻	2.649
Bicarbonato, HCO ₃ ⁻	0.140
Bromuro, Br ⁻	0.065
Borato, H ₂ BO ₃	0.026
Fluoruro, F ⁻	0.001
Sodio, Na ⁺	10.556
Magnesio, Mg ²⁺	1.272
Calcio, Ca ²⁺	0.400
Potasio, K ⁺	0.380
Estroncio, Sr ²⁺	0.013
Salinidad total	34.482%

* Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Cd. Universitaria, 04510, México, D.F.

Recibido: 23 de junio de 1994; Aceptado: 1 de noviembre de 1994.

mayoría de los elementos de la tabla periódica. De acuerdo con su concentración, los elementos en el agua de mar se dividen en:

- i) elementos mayores (>1ppm, 1×10^{-6} kg/L),
- ii) elementos menores (entre 1 ppm y 1 ppb) y
- iii) elementos traza (1 ppb o menos, 1×10^{-9} kg/L)

¿Son importantes los componentes menores y los elementos traza en el agua de mar?

Los constituyentes mayores muestran una composición constante, la cual está en función de la salinidad del agua de mar. En cambio, los componentes menores y traza actúan de una manera no-conservativa, por lo que son afectados por los procesos químicos, biológicos o de mezcla que se llevan a cabo en el océano, lo que los constituye en la herramienta de estudio más poderosa con que cuenta la oceanografía química.

Se sabe que los elementos menores y traza presentan concentraciones por debajo de su punto de saturación en el agua de mar (Tabla 2). Asimismo, presentan tiempos de residencia muy cortos (son eliminados rápidamente del agua). La combinación de estos dos hechos era un poco difícil de entender, pero actualmente se conocen los principales mecanismos de remoción de estos elementos del agua de mar, que son:

1) **Coprecipitación.** Los elementos menores y traza no forman compuestos como los que se muestran en la Tabla 2, sino que coprecipitan con los compuestos formados por las fases más abundantes. Por ejemplo, el plomo coprecipita con los óxidos de manganeso para formar $(Mn,Pb)O_2$.

2) **Adsorción.** Los elementos traza se adsorben en las partículas tanto de origen orgánico como inorgánico, y se hunden con éstas a través de la columna de agua.

3) **Equilibrio de óxido-reducción.** Un cambio en el número de oxidación de los elementos traza por procesos de oxidación-reducción puede afectar su solubilidad. Por ejemplo, el hierro en su forma trivalente (Fe^{3+}) es mucho menos soluble que el hierro divalente (Fe^{2+}). Así, en aguas suficientemente oxidantes donde el hierro trivalente es la forma dominante, la cantidad de hierro en solución será mucho menor.

4) **Control biológico de concentración.** Los crustáceos y otros organismos marinos tienen la capacidad de concentrar los metales traza con factores de enriquecimiento de varios miles de veces. En zonas costeras en las que existen descargas con alto contenido de metales, los niveles de concentración de éstos en los organismos pueden llegar a ser muy altos, lo que afecta a estas poblaciones así como a los otros seres vivos que los consumen, incluyendo a los seres humanos. El estado de oxidación del metal determina su comportamiento en los sistemas biológicos marinos. Por ejemplo, el selenio es fijado preferentemente por los organismos marinos en su forma hexavalente (SeO_4^{2-}) más que en su forma tetravalente (SeO_3^{2-}), el arsénico trivalente (AsO_3^{3-})

Tabla 2. Solubilidad de elementos traza en agua de mar estándar.

Elemento	Compuesto menos soluble	Concentración de saturación (mol/L)	Concentración max. obs (mol/L)
Lantano	$LaPO_4$	8×10^{-12}	2×10^{-11}
Torio	$Th_3(PO_4)_4$	2×10^{-12}	2×10^{-13}
Cobalto	$CoCO_3$	3×10^{-7}	6×10^{-9}
Níquel	$Ni(OH)_2$	6×10^{-4}	1×10^{-7}
Cobre	$Cu(OH)_2$	2×10^{-6}	5×10^{-8}
Plata	$AgCl$	6×10^{-5}	3×10^{-9}
Zinc	$ZnCO_3$	2×10^{-4}	2×10^{-7}
Cadmio	$CdCO_3$	1×10^{-5}	1×10^{-9}
Mercurio	$Hg(OH)_2$	80	8×10^{-10}
Plomo	$PbCO_3$	3×10^{-6}	2×10^{-10}

es generalmente mucho más tóxico que el pentavalente (AsO_4^{3-}). El mercurio es fijado más rápidamente por los organismos marinos en forma de complejos orgánicos, especialmente el metilmercurio, que en sus formas iónicas simples tales como el Hg^+ y Hg^{2+} . Lo mismo sucede con el plomo; los organismos prefieren los compuestos orgánicos de plomo a las formas iónicas simples de éste (Pb^{2+} , Pb^{4+}). Al morir los organismos, sus residuos caen en la columna de agua, 90% de estos residuos son reciclados y 10% se deposita en los sedimentos marinos.

De los elementos traza en el agua de mar, los isótopos tienen un amplio uso en oceanografía química. Los isótopos estables (los cuales no sufren un decaimiento radioactivo), como el ^{18}O , ^{13}C y el ^{34}S , se usan para medir el origen de una masa de agua o los procesos que han afectado al cuerpo de agua desde que se formó. La relación isotópica $^{16}O/^{18}O$ varía en una fase o región particular, por lo que su determinación permite caracterizar una masa de agua dada.

Los isótopos radioactivos (que sí sufren un decaimiento radioactivo), como el 3H , ^{14}C , ^{222}Ra , van decayendo en función del tiempo. Al tiempo transcurrido para que desaparezca la mitad de la concentración original del elemento se le conoce como vida media del elemento ($t_{1/2}$). Dependiendo del valor de ésta son las aplicaciones de estos elementos. El 3H con $t_{1/2}$ de 12.3 años se usa para determinar si las aguas de un acuífero son anteriores a que se iniciaran las pruebas nucleares o para evaluar los procesos de mezcla de las capas superiores del océano, así como su mezcla con agua dulce. El ^{14}C tiene $t_{1/2}$ de 5 730 años y se usa para medir edades hasta de 50,000 años.

¿Qué elementos químicos determinan la productividad biológica del océano?

Los océanos son considerados por diversos sectores como la solución a los problemas alimenticios de la raza humana. Es por esto que gran número de estudios se enfocan a determinar los factores que determinan la mayor productividad biológica de éstos. Analizado desde este punto de vista los elementos químicos en el océano se clasifican en **biolimitantes** (elementos cuya concentración es mínima o inexistente en aguas superficiales, como fósforo, nitrógeno y silicio), **biointermedios** (elementos cuya concentración es reducida en las aguas superficiales: carbono, calcio, bario y radio) y **bioilimitados** (elementos cuya concentración no muestra una disminución medible en aguas superficiales, tales como sodio, potasio, magnesio, estroncio, cloro, bromo, sulfuros, etcétera). Para determinar a qué categoría pertenece cada elemento, se mide la concentración en aguas superficiales y de fondo. Si la concentración es la misma, se considera que los organismos no están consumiendo este elemento en la superficie.

La intensidad de iluminación, la concentración de oxígeno, y la presencia de nutrientes, principalmente nitrógeno en la forma de nitratos (NO_3^-), fósforo como fosfatos (PO_4^{3-}) y silicio como sílice (SiO_2) son indispensables para que las diminutas células de fitoplancton del orden de micrómetros de tamaño puedan sintetizar los carbohidratos a partir del dióxido de carbono del agua y dar lugar a florecimientos de diversas especies.

¿A qué se debe la composición del agua del mar?

Los análisis de muestras de agua de mar de todo el mundo, tienen los mismos ingredientes en las mismas proporciones. Sólo se aprecian diferencias en la cantidad de sales presentes. Es difícil imaginar una solución tan grande y tan homogénea. Los principales mecanismos de aporte de sustancias químicas al mar son:

1) El intemperismo de las rocas continentales por la acción del agua y del viento, que a través de los ríos introduce algunos elementos al mar, principalmente Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 , Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-} . Las rocas ígneas se originaron a partir de magma, cuyos principales componentes son SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{MgO} + \text{CaO}$, $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$; la composición de éstas explican la composición del agua de los ríos.

2) Los procesos volcánicos aportan SO_2 , HBr , HCl , B , CO_2 y N_2 .

3) Los procesos hidrotermales, que corresponden a la convección de agua de mar a través de la corteza oceánica recién formada, aportan Li , Ba , Mn , Fe , Si , H_2S , cantidades menores de K , Rb y Ca , en tanto que Mg^{2+} y SO_4^{2-} son eliminados. Estudios realizados en los últimos años han mostrado que los aportes hidrotermales son tan importantes como los fluviales.

¿Por qué el agua de mar tiene un pH prácticamente constante?

El pH del agua de mar es comúnmente de 8.0. Las variaciones de pH están controladas por la relación de concentración entre los iones bicarbonato y carbonato, los cuales son muy abundantes en el agua de mar. Así, se tiene:



$$[\text{H}^+] = k [\text{HCO}_3^-]/[\text{CO}_3^{2-}]$$

Si se conoce la relación de concentración de iones bicarbonato a iones carbonato en un punto dado del mar, y si se conoce el valor de la temperatura y presión (que definen el valor de la constante de equilibrio k), se puede calcular la concentración de iones hidrógeno. Al comparar agua profunda del Pacífico (PP) (a 5 000 m de profundidad) con agua profunda del Atlántico (AP), el valor de k será el mismo, puesto que la temperatura y presión son iguales. La relación de concentración de H^+ en ambos océanos está dada por:

$$[\text{H}^+]_{\text{PP}}/[\text{H}^+]_{\text{AP}} = ([\text{HCO}_3^-]_{\text{PP}}/[\text{HCO}_3^-]_{\text{AP}})([\text{CO}_3^{2-}]_{\text{AP}}/[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{PP}})$$

$$[\text{H}^+]_{\text{PP}}/[\text{H}^+]_{\text{AP}} = (2.45 - 0.10/2.25 - 0.2) = 2.4$$

El contenido de iones H del Pacífico profundo es 2.4 veces mayor que el del Atlántico profundo, es decir, el agua del Pacífico es más ácida. Esta acidez adicional se debe al dióxido de carbono derivado de la oxidación de material orgánico.

¿De qué depende la concentración de elementos en el mar?

Existen dos factores que regulan la concentración de los elementos en el agua de mar:

1) La concentración en la fuente de origen, como pueden ser las rocas cristalinas o las emanaciones provenientes del interior de la Tierra.

2) La reactividad del elemento, la cual puede hacer que sea eliminado rápidamente del agua. Los mecanismos de remoción incluyen precipitación inorgánica, reacciones entre materiales disueltos y partículas sólidas y procesos biológicos. Los organismos marinos pueden concentrar los elementos en sus órganos hasta niveles muy altos.

Los elementos disueltos que son muy reactivos tienen tiempos de residencia muy cortos, en tanto que los elementos disueltos poco reactivos tienen tiempos de residencia muy largos. Se entiende por tiempo de residencia el tiempo promedio que un elemento dado permanece en un compartimento dado del ciclo hidrológico (agua, sedimento, corteza, aire, etcétera). Se calcula dividiendo la concentración del elemento en el compartimento dado, por ejemplo en el agua, entre la concentración de ese

elemento que entra por unidad de tiempo.

Con el objeto de entender cómo los muchos constituyentes del agua de mar, disueltos y particulados, tanto los naturales como los producidos artificialmente, se mueven a través de los diversos ciclos marinos, se iniciaron estudios de flujos globales, para lo cual fue esencial el estudio de los sedimentos marinos.

¿Cómo están constituidos los sedimentos del fondo de los océanos?

En términos generales los sedimentos del océanos son de cuatro tipos:

Sedimentos litogénicos: son los que se originan de la erosión de los continentes o a partir de los volcanes submarinos.

Sedimentos biogénicos: son los formados como resultado de la actividad biológica. Los más importantes son el material carbonatado y el material de sílice opalino. El CaCO_3 es usado por muchos organismos marinos para formar sus partes duras; cuando los organismos mueren y se hunden en las profundidades del mar se redisuelven liberando CO_3^{2-} y Ca^{2+} a la solución. Si la concentración de iones calcio y carbonato es tal que se alcance el producto de saturación, el agua se vuelve sobresaturada respecto a calcita y si la solución no se altera se precipita la calcita espontáneamente. Sin embargo, este proceso se lleva cabo muy lentamente. El punto de saturación varía con la presión y la temperatura, la solubilidad de la calcita está en función directa de la temperatura y la presión, por lo que al bajar en la columna de agua a una profundidad de 4500 m en el Atlántico y entre 3 500 y 4 000 en el Pacífico, la calcita se empieza a disolver. Esta profundidad (P) se conoce como profundidad de compensación de carbonatos y regula la distribución de carbonatos en los sedimentos del fondo.

Sedimentos hidrogénicos: son los formados a partir de los componentes disueltos en el agua de mar. Entre los más importantes dentro de este grupo están los nódulos polimetálicos, los que representan un recurso mineral de gran importancia por su contenido de metales.

Sedimentos cosmogénicos: son los formados en el espacio exterior y que arriban al planeta. Constituyen una parte mínima de los sedimentos oceánicos.

Se sabe que la composición química de los sedimentos marinos está en función de los procesos que los originaron. A través de su estudio es posible asociar los sedimentos a procesos biogénicos, autigénicos, diagenéticos, hidrotermales, antropogénicos, litogénicos o la combinación de varios de éstos.

¿Cuál es el futuro del océano?

El océano se ha usado como un basurero universal, al cual tarde o temprano llegan los productos de la civilización. La pregunta es si la entrada de tantas nuevas sustancias al medio ambiente

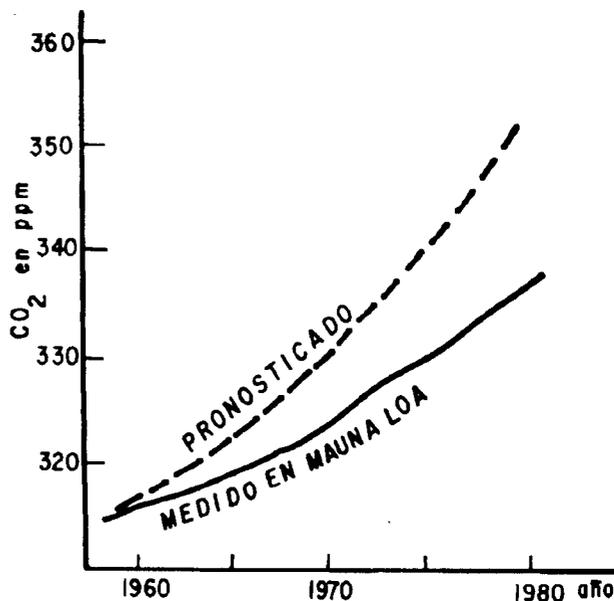


Figura 1. Dióxido de carbono en la atmósfera. Modificado de Brown *et al.* (1989).

marino va a cambiar su comportamiento químico.

El ejemplo más estudiado es el del dióxido de carbono. La Figura 1 muestra los datos de concentración de dióxido de carbono atmosférico medido en el observatorio de Mauna Loa en Hawai. Se observa también la concentración que se esperaba encontrar con base en la cantidad de combustibles fósiles consumidos, en el aumento en deforestación y en el aumento de áreas urbanas e industriales en los últimos años. Las mediciones muestran que el aumento fue sólo de 60% de lo predicho. Este aumento de CO_2 en la atmósfera ocasiona un efecto similar al de un invernadero, que produce un calentamiento en la atmósfera y la superficie terrestre, lo que podría ocasionar una fusión de los casquetes polares y un aumento en el nivel del mar. Estos procesos ya se han iniciado; en la última década la temperatura media del planeta ha aumentado 0.5°C y el nivel promedio del mar ha aumentado 10-15 cm en el mismo periodo, en parte por fusión de hielo y en parte por la expansión térmica de los primeros cientos de metros de la columna de agua.

Si bien el CO_2 atmosférico puede ser eliminado por tres mecanismos: los océanos, los suelos continentales y la biósfera terrestre, se ha comprobado que de éstos el más importante es el océano. Este 60% de CO_2 generado por el hombre equivale a un aumento de 12% del CO_2 existente antes de la revolución industrial. Por el principio del equilibrio químico, un aumento de 12%

de CO₂ en el agua de mar equivale a una disminución de 12% del CO₃ disuelto en ésta. ¿De qué manera esta disminución de carbonato disuelto va a afectar la química del océano? Aparentemente, el agua superficial estará por debajo del punto de saturación de carbonatos, lo que puede poner en peligro algunas especies de plantas y animales que lo utilizan. Sin embargo, los cambios climáticos que el aumento de CO₂ atmosférico puede llegar a producir tendrían consecuencias de mayor alcance.

A la fecha se desconocen con certeza los mecanismos de dispersión, degradación y remoción de los contaminantes orgánicos e inorgánicos que el hombre está introduciendo al océano en cantidades muy por arriba de los niveles naturales, así como los efectos que pueden ocasionar. El mayor impacto lo producirán las sustancias altamente reactivas en concentraciones bajas difíciles de detectar por los métodos analíticos tradicionales, con mecanismos de distribución altamente complejos.

Como se ve, el reto de la química marina es grande, interesante y prioritario dentro del estudio de las ciencias del mar, pues está ligado al desarrollo de la sociedad e incluso al futuro del planeta. ■

Referencias

- Broecker W. S., 1974. *Chemical Oceanography*, Harcourt Brace Jovanovich, Inc. 214 p.
- Brown J., A. Collins, D. Park, J. Phyllips, D. Rothery y J. Wright. *Seawater: its Composition, Properties and Behaviour*, 1989. The Open University (Ed.). Pergamon Press, 165 p.
- Brown J., A. Collins, D. Park, J. Phyllips, D. Rothery y J. Wright. *Ocean Chemistry and Deep-Sea Sediments*, 1989. The Open University (Ed.). Pergamon Press, 165 p.
- Johnson K. S., K. H. Coale and H. W. Jannasch, 1992. Analytical Chemistry in oceanography, *Analytical Chemistry*, 64, 22, 1065-1075.
- Millero F.J. and M. L Sohn, 1991. *Chemical Oceanography*, CRC Press, 532 p.
- Stowe K., 1987. *Essentials of Ocean Science*. John Wiley and Sons, 353 p.

EDUCACION QUIMICA

REVISTA TRIMESTRAL

Favor de renovar mi suscripción por: Un año Dos años

NOMBRE _____	TELÉFONO _____
DIRECCIÓN _____	
COLONIA _____	CÓDIGO POSTAL _____
CIUDAD _____	ESTADO _____ PAÍS _____

Envíe este cupón con

Cheque Giro Postal

Giro Bancario

A nombre de la:

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO a:

Dr. Andoni Garritz
 Director de *Educación Química*
 Facultad de Química, UNAM
 Apdo. Postal 70-197,
 Ciudad Universitaria, 04510
 México, D.F. MÉXICO

	Suscripción 1994		Un año		Dos años
Nacional:			N\$40.00		N\$70.00
América:			\$25 USD		\$45 USD
Europa:			\$30 USD		\$55 USD
África:			\$40 USD		\$75 USD
Asia:			\$45 USD		\$85 USD



**Si se ha terminado con este número tu suscripción,
NO DEJES PASAR MÁS TIEMPO PARA RENOVARLA.**

CHEMED 95

AGOSTO 5-10, 1995
OLD DOMINION UNIVERSITY, NORFOLK, VIRGINIA

CHEMED es una reunión muy especial de profesores de química que se lleva a cabo cada dos años desde 1973. En aquel año, Reg Friesen (profesor de la Universidad de Waterloo en Canadá y miembro del Consejo Editorial Internacional de la revista *Educación Química*) tuvo el acierto de reunir por primera vez a profesores del bachillerato con los del nivel universitario.

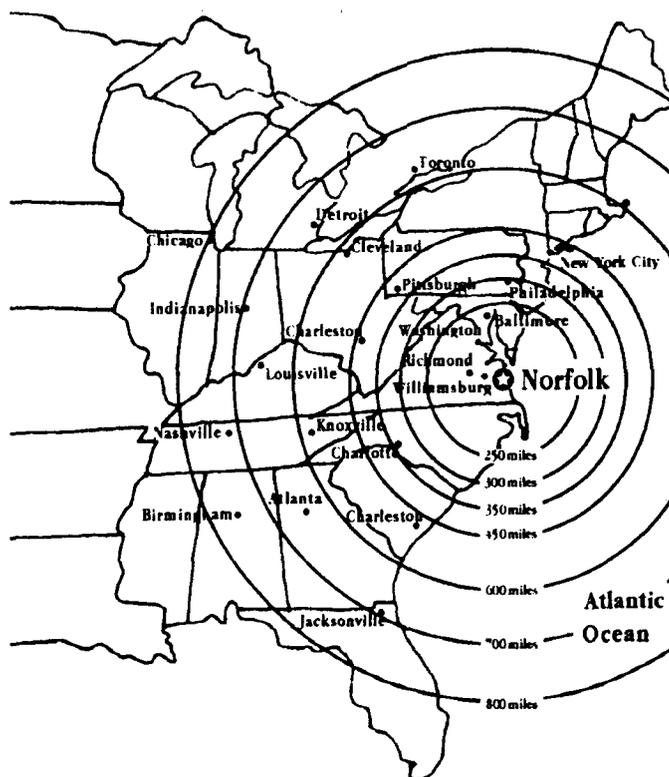
Actualmente CHEMED reúne a cientos de profesores de química de todos los niveles educativos, en un ambiente informal y muy propio para llevar a toda la familia, en el que se comparten las mejores ideas para la enseñanza teórica y experimental de la química.

En 1995 toca el turno a la Universidad Old Dominion de Norfolk, en el estado de Virginia de los Estados Unidos de Norteamérica.

Algunas de las actividades serán:

- Talleres de trabajo "Manos a la ciencia"
- Trabajos libres
- Sesiones de carteles
- Demostraciones maestras
- Ponentes magistrales
- Conferencia honoraria
- Un día especial para profesores de la enseñanza básica
- Actividades sociales
- Actividades para niños
- Visitas guiadas educacionales
- La tabla periódica más grande del mundo (en un estadio)
- Exhibición de material educativo
- Páneles de discusión

EASTERN UNITED STATES



I knew about CHEMED 95 in the Journal *Educación Química*

Please put my name on your mailing list so I can receive further information and mailings concerning the meeting.

Please print legibly or type:

Complete this form and mail to:

ChemEd 95
Department of Chemistry and
Biochemistry
Old Dominion University
Norfolk, Virginia 23529-0126

Name _____
Address _____
City _____ State _____
Country _____ ZIP _____