

La barrera entre la revisión de la investigación sobre un tema especializado y una contribución para la actualización docente es difusa. En el tren del desarrollo científico, tal vez el primer paso que se da después del descubrimiento sea el de su sistematización en forma de un artículo de revisión. De allí a su utilización en el proceso docente sólo hay un paso más. Esta sección PROFESORES AL DÍA recoge, pues, artículos de revisión de tal forma que su "digestión" no desemboque en "congestión", sino en actualización docente.

# Importancia de la química en la conservación de monumentos de piedra caliza y mármol

Juan Méndez Vivar\*

## Abstract (The importance of chemistry in the conservation of limestone and marble monuments)

The importance of the conservation of our monuments made of limestone and marble is stated. A brief revision is done regarding the chemical reactions causing acid precipitation. It is also presented an overview of the most important chemical agents employed to consolidate limestone, as well as new and promising experimental approaches.

## Introducción

Un gran porcentaje de las obras artísticas que el ser humano ha creado a lo largo de su civilización están hechos de piedra caliza o mármol. En el caso particular de México, tenemos como ejemplos una parte del arte precolombino tanto en objetos de pequeñas dimensiones como en estelas y en obras arquitectónicas en las zonas arqueológicas de Teotihuacán, Monte Albán, El Tajín, Palenque, Bonampak, Chichen Itzá y en general, del sureste del país (Lowe, 1990; Cabrera, 1990). El uso de la piedra caliza como material de construcción y para el tallado de estelas se debe a la abundancia del mineral en las zonas habitadas por nuestros ancestros (Fernández, 1996; García, 1996). En lo que se refiere a la época virreinal, en muchos casos erróneamente llamada época colonial (Artigas, 1995), contamos con una gran cantidad de edificios que incluyen iglesias y catedrales. Algunos ejemplos de obras en mármol en el Distrito Federal son las estatuas de la Alameda Central, el Palacio de Bellas Artes, el Hemiciclo a Juárez y el monumento a los Niños Héroes, entre otros.

La piedra caliza y el mármol son químicamente iguales, pero diferentes en cuanto al tamaño de los cristales que los componen y su porosidad (la piedra caliza se compone de cristales más pequeños y tiene mayor porosidad). Ambos se componen del mineral calcita, que es la forma termodinámicamente estable del carbonato de calcio (Roberts *et al.*, 1990). Este mineral es altamente susceptible al deterioro por la lluvia ácida, la cual representa un grave problema en

ciudades como la de México en que existe un gran número de fuentes contaminantes. Adicionalmente, las piezas de mármol y piedra caliza expuestas a la intemperie también se deterioran por la cristalización en su estructura interna de sales (que inicialmente penetran en la piedra disueltas en agua) o agua, (en zonas con temperaturas muy bajas) y por fenómenos biológicos y térmicos (Amoroso y Fassina, 1983).

En el proceso de conservación de los monumentos de piedra es importante la participación de investigadores de diferentes áreas tales como geología, química, biología, ingeniería, arquitectura y ciencia de materiales, por lo que representa una excelente oportunidad para establecer colaboraciones multidisciplinarias.

El deterioro de la piedra se ha acelerado dramáticamente en el presente siglo, debido a la emisión a la atmósfera de residuos gaseosos provenientes de combustibles fósiles y a la industrialización, como se expone a continuación.

En todo el país existen joyas arquitectónicas esperando impacientemente a ser rescatadas (Artigas, 1995). Si bien es cierto que la conservación de nuestra herencia cultural en general, y de la realizada en piedra en particular, es un reto para los investigadores, también representa una gran responsabilidad para todos como parte de la sociedad. El legado artístico que ha perdurado hasta nuestros días es la herencia de las futuras generaciones, que tienen el mismo derecho que nosotros a recrearse en el arte que el ser humano ha generado.

## La lluvia ácida

Las rocas (piedra caliza, mármol) sufren un proceso de deterioro natural cuando están expuestas a la intemperie por la humedad del aire. El daño se agudiza en ambientes en que la atmósfera está muy contaminada, como es el caso de las grandes ciudades. Las emisiones contaminantes son variadas y afectan de diversas formas a la piedra.

La lluvia ácida es quizá el factor más perjudicial para la piedra caliza. El agua de lluvia común es ligeramente ácida debido a una pequeña cantidad del gas bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera, que reacciona con ella. En efecto, se trata de una reacción química (éste es sólo un ejemplo de que las reacciones químicas son lo más natural en nuestra vida diaria) que produce ácido carbónico, el cual permanece disuelto en el agua y se disocia en ella:

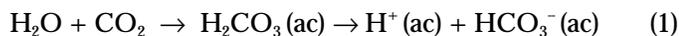
\* Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Depto. de Química. Apdo. Postal 55-534, México, D.F., 09340.

Recibido: 9 de diciembre de 1996;

Aceptado: 5 de mayo de 1997.



Figura 1. Dintel 24 del edificio 23 en Yaxchilán, Chiapas. Actualmente se encuentra en el Museo Británico en Londres (tomada de la página 44 de la Revista *Arqueología Mexicana*, vol. IV, núm. 22, 1996).

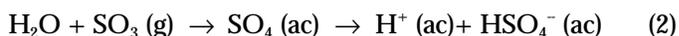


donde (ac) indica que se trata de una solución acuosa; es decir, que el agua de la lluvia es el disolvente.

El agua de lluvia común tiene un pH ligeramente ácido e igual a 5.6 (Lindsay, 1979). La combustión de los materiales fósiles tales como carbón, petróleo, gasolina o gas natural contribuye a la emisión de otros gases en la atmósfera como el trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) y algunos óxidos de nitrógeno, que también reaccionan con el agua (¿cuántas reacciones ocurren frente a nuestras propias narices?). En realidad, la formación del  $\text{SO}_3$  se logra a partir de la reacción entre el gas  $\text{SO}_2$  y el oxígeno  $\text{O}_2$ , además de una combinación de factores tales como la radiación ultravioleta de la luz del sol y la acción catalítica de las partículas (polvo, por ejemplo) suspendidas en el aire. En el Distrito Federal la zona noroeste es la que presenta la mayor cantidad de precipitación ácida. Ésta proviene en gran parte de las industrias (Garritz y

Chamizo, 1994).

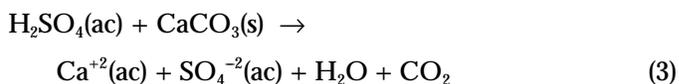
La reacción del  $\text{SO}_3$  con el agua se puede escribir como sigue:



La formación del ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) produce una disminución adicional del pH del agua de lluvia (Brown y LeMay, 1987). Cuanto mayor es la concentración de  $\text{SO}_3$ , menor es el pH del agua y más “ácida” la lluvia; de ahí se deriva el término. Para citar sólo un ejemplo de cómo la lluvia se ha vuelto más ácida en los últimos años, en la zona de Ciudad Universitaria de la ciudad de México el pH de la lluvia ha variado considerablemente, de 6.22 en 1980 a 4.67 en 1989, siendo 4.05 el pH más bajo, detectado en 1985 (Bravo *et al.*, 1990; Gómez-Urquiza de la Macorra *et al.*, 1995). Esto representa un aumento de casi cien veces en la concentración del ion  $\text{H}^+$  con respecto a la concentración normal. Esta situación no ha cambiado favorablemente en forma significativa en los últimos años (Hernández *et al.*, 1996). En la actualidad se prefiere emplear el término “precipitación ácida” como la forma más adecuada para designar a la precipitación total, la cual incluye tanto a la precipitación húmeda (lluvia) como a la precipitación seca (contaminantes sólidos) (Garritz y Chamizo, 1994).

#### ¿Por qué se deterioran las rocas?

La piedra caliza y el mármol, que son esencialmente carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), reaccionan fácilmente con la lluvia ácida (compuesta principalmente por  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) disolviéndose:



donde el grado de disolución depende de la concentración del ácido; a mayor concentración de éste, mayor disolución del carbonato de calcio. El problema de la disolución es particularmente grave en aquellos casos en que el tallado se compone de finos detalles en bajo o alto relieve de unos cuantos centímetros, porque la superficie se puede desintegrar fácilmente.

Adicionalmente al problema de la disolución está el de la precipitación del compuesto formado en la reacción, el sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ); esto ocurre como la formación de la sal dihidratada ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) cuando la piedra se seca. Esta precipitación ocurre después de que el compuesto disuelto en agua penetra en la estructura interna del mármol a través de los poros por efecto capilar y cristaliza en su seno cuando la piedra se seca. La presión ejercida por los cristales es lo suficientemente alta como para producir el resquebrajamiento de la piedra (Lewin, 1982; Charola y Lewin, 1979).

### Panorama de los esfuerzos realizados para rescatar las obras de piedra caliza y mármol

El primer paso para tratar la superficie deteriorada de una obra en piedra debería ser la recopilación de información sobre sus propiedades físicas y químicas para atacar adecuadamente el problema. La estrategia parece demasiado obvia; sin embargo, los curadores de obras de arte en los museos, al igual que muchos investigadores encargados de rescatar edificios o esculturas expuestas a la intemperie, enfrentan muchas veces situaciones de emergencia en que se deben tomar medidas inmediatas para remediar el estado de deterioro de algunas piezas. Esto ha conducido en muchos casos a la aplicación de tratamientos con agentes que, lejos de mejorar las condiciones de una obra, la llevan a un estado de deterioro aún más grave (Honwyborne *et al.*, 1990). En términos generales las estrategias usadas tienen como finalidad consolidar una estructura, es decir, reforzarla interna y externamente para mantenerla agregada, frenando el proceso de deterioro.

A continuación se presentan los métodos de conservación más empleados, desde los empíricos hasta los que toman en cuenta la afinidad química entre la superficie de la piedra y el material consolidante o protector.

#### Cera y aceite

Entre las múltiples opciones que se han desarrollado como intentos para conservar la piedra está el uso de cera de abeja y sistemas con base en aceites como recubrimientos para proteger del agua la superficie de la piedra. Este recurso lo emplearon los antiguos romanos y los italianos en la época Renacentista (Honwyborne *et al.*, 1990). Este procedimiento es obsoleto, entre otras cosas porque los materiales empleados generalmente producen cambios de color en la superficie de la piedra, y en algunos casos atraen el polvo contribuyendo a que la apariencia empeore; por otro lado, no penetran en la estructura para actuar como verdaderos consolidantes.

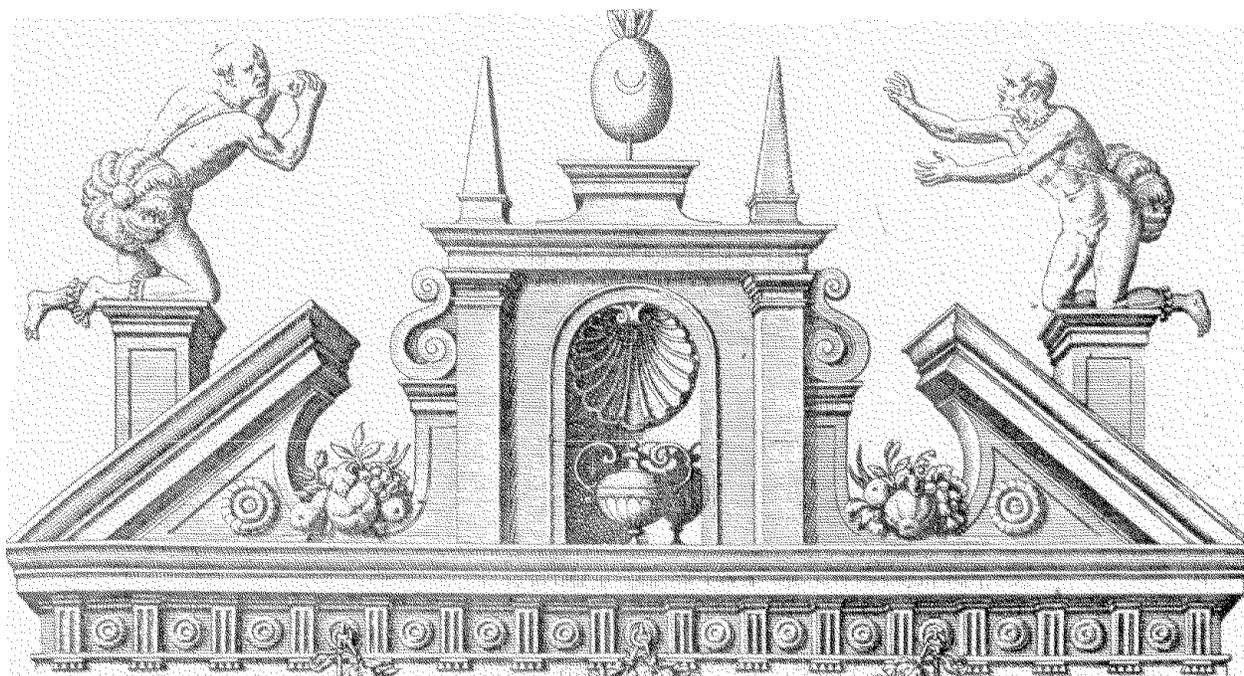
#### Sistemas basados en TEOS

Una estrategia diferente ha consistido en el uso del alcóxido tetraetoxisilano  $[\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4, \text{TEOS}]$ . El primer intento de consolidar piedra mediante esta ruta, de acuerdo con la literatura, fue hecho por Von Hoffman en 1861 para frenar el deterioro del Parlamento de Londres. Este edificio fue construido con una variedad de piedra caliza denominada Clipsham (Von Hoffman, 1861). El estudio no rindió muchos frutos y permaneció en el olvido hasta que fue retomado en 1965 por la compañía Wacker Chemie donde se patentó una solución preparada con base en TEOS, denominada Wacker OH (la patente inicial fue registrada en 1965 en Alemania, pero su número no está disponible; la patente

registrada en EUA es de 1976 y el producto se conoce comercialmente como Conservare OH) para el tratamiento de materiales pétreos, especialmente rocas de sílice (Bosch *et al.*, 1976). Las razones para haber seleccionado al TEOS como agente consolidante candidato fueron su baja viscosidad y tensión superficial que permiten una penetración rápida a la estructura de la piedra, así como la formación de una red de enlaces Si—O—Si que son inertes a los efectos de la radiación ultravioleta (UV). En nuestro país se está investigando esta ruta para la consolidación. Los resultados preliminares indican que se trata de un procedimiento adecuado para el tratamiento de canteras de la región de Guanajuato (Cervantes *et al.*, 1996).



Figura 2. Dintel 25 del edificio 23 en Yaxchilán, Chiapas. Actualmente se encuentra en el Museo Británico en Londres (*Ibid*, p.45).



#### *Sistemas basados en MTMOS*

En 1976 se formuló (Arnold y Price, 1976) un producto con base en metiltrimetoxisilano  $[(\text{CH}_3)_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3]$ , MTMOS] que contenía naftanato de plomo como catalizador para la polimerización. El producto se denominó comercialmente Brethane, pero ha dejado de usarse, en parte debido a la toxicidad del componente de plomo. Posteriormente se empleó MTMOS puro como agente consolidante (Larson, 1983). Los resultados descritos brevemente son que el MTMOS parece ser un agente adecuado para consolidar rocas de sílice, pero muy pobre para piedra caliza en cuyo caso el MTMOS tiende a evaporarse fácilmente antes de polimerizar (Wheeler *et al.*, 1992).

#### *Resinas epóxicas y acrílicas*

Son polímeros orgánicos, y han sido usados ampliamente en los últimos treinta años (Larson, 1990). Ofrecen la ventaja de adherirse a la superficie y rellenar las grietas; sin embargo, los enlaces C-C y C-O de que están formados son inestables a la radiación UV, por lo que se degradan y el agente consolidante se desprende después de un tiempo. Los resultados reportados a la fecha son variados; en algunos casos se menciona que en lugar de ser una solución contribuyen a acelerar el deterioro de las piezas (Honwyborne *et al.*, 1990); por otro lado, algunos investigadores han encontrado que las resinas epóxicas son lo más adecuado para la piedra caliza en comparación con los consolidantes alcoxisilanos (Selwitz, 1992). Las resinas epóxicas se han usado exitosamente en la

República Checa por el Prague Institute of Chemical Technology en estatuas de hasta 2.40 m de longitud, aplicando el recubrimiento al vacío. Estudios posteriores han demostrado que la resina penetra hasta una profundidad de 20 cm en la piedra, cuya estructura queda reforzada efectivamente, según determinaciones del módulo de ruptura. Aparentemente una buena consolidación depende tanto de una adecuada selección del consolidante como del método de aplicación.

#### *Atmósfera controlada*

Una forma segura de frenar el deterioro de la piedra es colocar el objeto en una atmósfera controlada (porcentaje de humedad, temperatura). Esta opción aparte de ser muy cara, en algunos casos es imposible de llevar a cabo debido a restricciones tales como las grandes dimensiones de obras como los edificios, o su ubicación.

#### *Sales*

Actúan como cementos al introducirse en la estructura de la piedra. Se ha utilizado sulfato de bario, el cual ha demostrado ser útil solamente para consolidar la piedra caliza; sin embargo, tiene el inconveniente de penetrar poco y es difícil de aplicar en forma homogénea (Sayre, 1970). Una manera alternativa es el recubrimiento con una formulación de hidróxido de bario y urea para producir la deposición de carbonato de bario; sin embargo, éste forma sulfato de bario con la lluvia ácida (Lewin y Baer, 1974). Otra opción es la

aplicación de una solución saturada de hidróxido de calcio, el cual es poco soluble, por lo que es necesario repetir el procedimiento varias veces para depositar una cantidad apreciable del consolidante (Price y Ross, 1984).

#### *Los agentes acoplantes*

Una opción prometedora (Wheeler *et al.*, 1996) consiste en utilizar diferentes agentes llamados acoplantes o pasivadores (Plueddemann, 1991). Estos agentes son sustancias químicas que contienen dos grupos funcionales en una molécula (por ejemplo aminopropiltrimetoxisilano), de los cuales un grupo tiene afinidad por la superficie de la piedra (ion amonio) y se enlaza directamente a los iones componentes de la misma, ( $\text{Ca}^{+2}$  o  $\text{CO}_3^{-2}$  en el caso del mármol y la piedra caliza) de tal forma que permanecen enlazados químicamente. De esta manera, el reforzamiento se puede lograr a escala atómica. El grupo funcional que queda libre (grupo metoxi) puede ser utilizado posteriormente para "acoplar" la nueva superficie con un acabado final aplicado posteriormente. El acabado se obtiene utilizando alcóxidos metálicos (de silicio, por ejemplo) (Bradley *et al.*, 1978). Estas sustancias tienen la propiedad de formar polímeros inorgánicos mediante un mecanismo de hidrólisis y condensación (Brinker y Scherer, 1990). En este caso, la piedra previamente tratada con el agente acoplante se recubriría con una película de la solución de alcóxido como un barniz, de tal forma que el polímero final se formaría conjuntamente entre el alcóxido hidrolizado y el grupo funcional libre (que puede ser un grupo polimerizable) del agente acoplante. Esto daría lugar a una consolidación efectiva.

El agente consolidante ideal es aquel que refuerza la estructura de la piedra, imparte un carácter hidrofóbico a la superficie y la protege de los agentes contaminantes. A su vez, el reforzamiento de la estructura de la piedra se determina cuantitativamente evaluando las propiedades de dureza, impacto, abrasión, compresión y flexión (Garcés, 1994).

Como en general no son muchas las investigaciones que se han hecho en el campo de la consolidación en nuestro país (Cervantes *et al.*, 1996, Garcés, 1994), o bien, se trata de investigaciones en curso (Wheeler *et al.*, 1996), la siguiente etapa es monitorear muestras tratadas exponiéndolas en sitios estratégicos que sean representativos de las condiciones en que una obra artística está colocada. Este proceso lleva tiempo (años), así que los resultados concluyentes no son inmediatos.

#### *¿Quiénes están tomando cartas en el asunto?*

A nivel nacional e internacional existe una creciente preocupación en el terreno de la conservación (Clark, 1993). En

muchos casos los museos han tomado la iniciativa, apoyados en la infraestructura de las universidades para realizar investigación, creando alianzas con ellas. El resultado son una serie de congresos nacionales e internacionales dedicados al intercambio de experiencias y a la presentación de diferentes estrategias encaminadas a la conservación de estos materiales. Enlisto a continuación algunos de estos eventos:

- Congreso Mexicano de Química. Se realiza anualmente y tiene una sesión de trabajos libres dedicada a la Química de Restauración y Arte.
- International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Se han realizado ocho, de los cuales el más reciente se efectuó en 1996 en Berlín.
- International Congress of the International Association of Engineering Geology. Se han realizado siete. El más reciente en 1994.
- International Conference on Advanced Materials. Cancún, México, 1995.
- Materials Issues in Art and Archaeology. A la fecha se han realizado cinco, el más reciente en Boston, EUA en 1996.

#### **Comentarios finales**

La consolidación de materiales prees es un campo de investigación complejo, puesto que requiere de varias disciplinas para la realización de un estudio completo. Es importante porque contribuye a la preservación de nuestro patrimonio cultural y al estudio de la estabilidad ambiental de los materiales.

Todos podemos participar en la conservación de nuestros monumentos. La forma inmediata es adquirir conciencia de que la emisión de contaminantes es un problema que además de afectar nuestra salud, también está destruyendo nuestra herencia cultural. Debemos evitar el uso del automóvil en la ciudad, hasta donde sea posible. Como se mencionó en un párrafo anterior, los combustibles empleados por los vehículos automotores son una de las fuentes más agudas de agentes nocivos para los monumentos. En lo que se refiere a los objetos en los museos, otra forma de contribuir a la adecuada conservación es evitar tocarlos. La superficie porosa de la piedra absorbe la grasa de los dedos y gradualmente se oscurece, haciéndose necesaria una limpieza.

#### **Agradecimientos**

El autor agradece a CONACYT (México)/NSF (Estados Unidos) por el apoyo para la realización de su estancia en The Metropolitan Museum of Art de Nueva York, como parte de las actividades del Proyecto de colaboración internacional E120.870. Asimismo, agradece al Dr. George S. Wheeler su perseverancia para la realización del proyecto. ▀

**Bibliografía**

- Aliphat, M. M., Arqueología y paisajes del alto Usumacinta. *Arqueología Mexicana*, IV[22], 24-29, 1996.
- Amoroso, G. y Fassina, V., en Stone Decay and Conservation. *Material, Science Monograph II*, Elsevier, Amsterdam, 1983.
- Arnold L. y Price, C., Alkoxysilanes for the preservation of stone. *BRS Note*, Watford, HMSO, 1-4, 1976.
- Artigas, J. B., "Viceregal architecture: materials, reconstruction and environment, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. V. 352*, Editado por P. B. Vandiver, J. R. Druzik, J. L. Galvan Madrid, I. C., Freestone y G. S. Wheeler, MRS, Pittsburgh, 1995, p. 13-20.
- Bosch, E., Roth, M. y Gogolak, K., patente EUA 3,995,988, 1976.
- Bradley, D. C., Mehrotra, R. C. y Gaur, D. P., *Metal Alkoxides*, Academic Press, Nueva York, 1978.
- Bravo, H., Sosa, R. y Torres, R. "Study of the horizontal sulfur dioxide concentration on the metropolitan zone of Mexico City", *Proc. 83rd Annual Meeting Air and Waste Management Ass.*, Pittsburgh, junio 24-29, 1990.
- Brinker, C. J. y Scherer, G., *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Academic Press, San Diego, 1990.
- Brown, T. L. y LeMay, H. E. Jr., *Química La Ciencia Central*, Prentice-Hall Inc, México, 3a. ed., 1987, p. 386-388.
- Cabrera, R., The metropolis of Teotihuacán, en *México, Splendor of thirty centuries*, The Metropolitan Museum of Art, Nueva York, 1990. p. 100.
- Cervantes, J. A., Alvarez, D. E., Lira, J. R. y Hernández, L. E., "Estudio de consolidación de diferentes canteras regionales, *Rev. Soc. Quím. Méx.* 40 [número especial], 89, 1996.
- Charola, A. E. y Lewin S. Z., *Scanning Electron Microscopy*, I, 378, 1979.
- Charola, A. E. y Lewin, S. Z., *Proc. Third Intl. Congress on Deterioration and Preservation of Stones*, Venecia, 1979, p. 153-163.
- Clark, D. E., "Environmental stability of materials-Issues and opportunities", *Mat. Res. Soc. Bull. V. XVIII*, núm. 9, 25-28, 1993.
- Garcés Fierros, C. F., "Restauración de una casa virreinal en Rep. del Salvador No. 41 y la consolidación de cantera intemperizada en la Ciudad de México", Tesis de maestría, Fac. de Arquitectura, UNAM, 1994.
- García Moll, R., Yaxchilán, Chiapas, *Arqueología Mexicana*, IV[22], 36-45, 1996.
- Garriz, A. y Chamizo, J. A., *Química*. Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, 1994, p. 721-722.
- Gómez-Urquiza de la Macorra, M., Torres Montes, L., Reyes García, M., Galván Madrid, J. L., Genescá Llongeras, J. y Pérez, T., *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, V, 352. Editado por P. B. Vandiver, J. R. Druzik, J. L. Galván Madrid, I. C. Freestone y G. S. Wheeler, MRS, Pittsburgh, PA. 1995, p. 51-62.
- Hernández, R., Flores, M. A., Aguilar, R., Valderrbano, M. L., y Colín, M., "Contaminación atmosférica en la Ciudad de México", *Rev. Soc. Quím. Méx.*, 40 [número especial], 59, 1996.
- Honwyborne, D., Ashurst, J., Price, C. y Ross, K., "Surface treatments", *Conservation of Building and Decorative Stone. V. 2.* J. Ashurst y F. G. Dimes (eds.). Butterworth-Heinemann, Londres, 1990, p. 155-207.
- Larson, J. A., "Museum approach to the techniques of stone conservation", *Fourth International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*. University of Louisville, 1983, p. 219-238.
- Lewin, S. Z., y Baer, N. S., *Stud. Conserv.*, 19, 24-35, 1974.
- Lewin, S. Z., *Conservation of Historic Stone Building and Monuments*. National Academy, Washington, 1982, p. 120-144.
- Lindsay, W. L., *Chemistry Equilibra in Soils*, Wiley, Nueva York, 1979, p. 79-85.
- Lowe, W., "Izapa: Between Olmec and Maya", en *México, Splendor of thirty centuries*, The Metropolitan Museum of Art, Nueva York, 1990, p. 86-114.
- Plueddemann, E., *Silane Coupling Agents*, 2ª ed., Plenum Press, Nueva York, 1991.
- Price, C. A. y Ross, K. D., *Monumentum*, 27[4] 301-312, 1984.
- Roberts, W. L., Campbell, T. J. y G. R. Rapp, *Encyclopedia of Minerals*, 2ª ed., Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1990.
- Sayre, E. V., *Conservation of Stone*, ed. por Thomson, G. ICC, Londres, 1970. p. 115-118.
- Selwitz, C. M., *Epoxy Resins in Stone Consolidation*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 1992, p. 39-48.
- Von Hoffman, A. W., "Stone-preserving Processes: Royal Institute of Architects", *The Builder*, 19, 103-105, 1861.
- Wheeler, G. S., Schein, A., Shearer, G., Su, S. H. y Blackwell, C. S., *Anal. Chem.*, 64[5], 347A-354A, 1992.
- Wheeler, G. S., Goins, E. S., Méndez-Vivar, J. y Brinker, C. J., "The development and study of strenghtening agents for limestone using sol-gel and coupling agent technologies", Proyecto CONACYT/NSF. En curso.