

## Mineralogía y geoquímica de los procesos de degradación en monumentos históricos: primer acercamiento a un caso mexicano (Morelia, Michoacán)

**Mikhail Ostroumov<sup>1,\*</sup>, Víctor Hugo Garduño-Monroy<sup>1</sup>, Héctor Carreón-Nieto<sup>1</sup>,  
Rufino Lozano-Santa Cruz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Departamento de Geología y Mineralogía, Ciudad Universitaria, Edificio "U", Apdo. Postal 888, Morelia, Michoacán.

<sup>2</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F.

\* ostroum@zeus.umich.mx

### RESUMEN

*En este trabajo se presentan los primeros datos sobre las particularidades mineralógico-geoquímicas del proceso de degradación en los monumentos históricos del Exconvento de San Francisco, Morelia (Michoacán, México). Este convento fue el primer conjunto arquitectónico del barroco en Morelia (la construcción se terminó en 1610) en construirse enteramente de rocas volcánicas piroclásticas ("cantera"). Las muestras se caracterizaron por microscopía óptica, análisis químicos, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Los resultados obtenidos muestran que la composición mineralógica, las particularidades geoquímicas y los procesos de alteración de las 20 muestras analizadas son semejantes en el monumento histórico estudiado. Como resultado de la degradación se originaron algunas neoformaciones minerales específicas entre las cuales predominan sulfatos (yeso), cloruros (halita), fosfatos de calcio amorfos y, en menor proporción, carbonatos (calcita, ankerita). Esta composición mineralógica muestra que los principales elementos indicadores de alteración en los edificios históricos estudiados son azufre, cloro y fósforo. Al mismo tiempo hay que señalar el diferente grado de devitrificación de las ignimbritas, lo que es un factor importante en su degradación: una menor intensidad y/o ausencia de devitrificación es característica de las ignimbritas que presentan buena consolidación y/o mejores propiedades de resistencia mecánica a los procesos de intemperismo.*

*Los resultados obtenidos aportan nuevos datos a la mineralogía de las formaciones minerales recientes que son características de los procesos de degradación en los monumentos históricos mexicanos ubicados al suroeste de México. Estos datos, a su vez, podrán servir en un futuro estudio sistemático de los conjuntos arquitectónicos no sólo en la ciudad de Morelia sino también en otras ciudades de la República Mexicana que son consideradas en el mundo como patrimonio de la humanidad.*

*Palabras clave: Mineralogía, geoquímica, alteración, monumentos históricos, Morelia, Mexico.*

### ABSTRACT

*In the framework of ongoing research of the building stones used throughout the baroque style period in the city of Morelia (Michoacan, Mexico), the mineralogical, geochemical and petrographical properties of 20 ignimbrite samples were determined. Data were collected on weathered and unweathered volcanic pyroclastic stonework from the San Francisco convent. This was the first architectural ensemble of Morelia which was built entirely from this stone, called "cantera" (the construction ended in 1610). The samples were studied by means of optical microscopy (OM), chemical analysis, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). The results show that the mineralogical composition, geochemical features, and the alteration process of the analyzed samples are very similar in this historical monument. As a result of degradation, some specific neoformations originated, such as sulfates (gypsum).*

*chlorides (halite), amorphous calcium phosphates, and in smaller proportion, carbonates (calcite, ankerite). This mineralogical composition shows that the main elements indicating alteration in the studied historical buildings are sulphur, chlorine and phosphorus. At the same time, it should be pointed out that the different degree of devitrification in ignimbrite becomes a very important factor in its degradation: lower intensity and/or absence of devitrification is a characteristic of ignimbrites, which promotes good consolidation and better properties of mechanic resistance to alteration.*

*The results obtained in this research provide new information about the mineralogy of recent formations that characterizes the degradation processes in Mexican historical monuments located in southwestern Mexico. At the same time, these data may result useful in future systematic studies of historical buildings, not only in the city of Morelia, but also in many other Mexican cities considered to be part of UNESCO's Humankind Heritage.*

*Key words: Mineralogy, geochemistry, weathering, historical buildings, Morelia, Mexico.*

## INTRODUCCIÓN

Existe un consenso general de que al principio del tercer milenio sería importante llevar a cabo en todo el mundo actividades urgentes y necesarias para la preservación y conservación de los monumentos y edificios históricos. Sin duda alguna, el primer paso en cualquier estudio de este tipo es la identificación y caracterización de los procesos y fenómenos de alterabilidad más significativos que se desarrollaron y se desarrollan en los materiales pétreos naturales. Se conoce que estos materiales se caracterizan no sólo por poseer diferentes composiciones mineralógicas y particularidades geoquímicas, sino también por presentar diversas texturas petrográficas. Por eso, resulta claro que solamente sobre la base del conocimiento de la composición mineralógica, rasgos geoquímicos y petrografía de estos materiales, sería posible explicar los mecanismos y particularidades de su intemperismo natural y/o urbano, lo que finalmente serviría para proponer en cada caso concreto las metodologías adecuadas para su conservación en el patrimonio histórico.

Se conoce bien que entre los procesos de alterabilidad que se desarrollan en los edificios y monumentos históricos, se puede distinguir dos tipos fundamentales: 1) naturales, que se caracterizan por los mismos mecanismos y productos de alteración ya establecidos en diferentes tipos de yacimientos y rocas (Carroll, 1971), y 2) artificiales, los cuales están relacionados con el ambiente específico urbano que conducen a la transformación de los materiales pétreos naturales. En otras palabras, los edificios y monumentos contruidos con diferentes materiales pétreos, sufren procesos de alteración que son, en gran medida, similares a los observados en las rocas naturales. Además, en cada caso concreto se añaden procesos específicos derivados de los ambientes urbanos o industriales contaminados (Prada-Pérez y Álvarez-Pérez, 1997; Marfunin, 1998).

Últimamente, en algunos países europeos tales como Italia, Francia, y España se iniciaron estudios mineralógicos y geoquímicos de los procesos de degradación que durante

siglos se han desarrollado en diferentes edificios y monumentos históricos (e.g., Sánchez-Navas *et al.*, 1992; Franzini, 1995; López-Acevedo *et al.*, 1997). Como resultado de estas investigaciones se distinguen actualmente los siguientes procesos de alterabilidad más significativos: formación de pátinas de cantera, alteración en ambientes industriales y urbanos, interacción con otros materiales de construcción, biodeterioro y pátinas naturales, y depósitos en fuentes monumentales.

Por otro lado, en el continente americano, y en particular en México, no se conocen todavía investigaciones de este tipo a pesar de que muchos monumentos históricos del barroco en América Latina, por su edad, corresponden a varios conjuntos arquitectónicos europeos en los que actualmente se realizan estudios mineralógicos y geoquímicos detallados.

Considerando lo anterior, el objetivo de este trabajo es caracterizar, desde el punto de vista mineralógico-geoquímico, los procesos de degradación que son característicos en las rocas volcánicas piroclásticas (ignimbritas) usadas en la construcción de los edificios del centro histórico de la ciudad de Morelia, en particular del Exconvento de San Francisco. La construcción inicial del convento se sitúa entre los años 1525 a 1536, siendo terminada finalmente en 1610. Se eligió el estudio de este Exconvento debido a que fue el primer complejo arquitectónico de Morelia en construirse enteramente a partir de rocas volcánicas piroclásticas ("cantera") y que, además, engloba todas las etapas posteriores de construcción y reconstrucción de la ciudad.

Al principio de esta investigación se realizó una serie de observaciones megascópicas de los materiales pétreos ("cantera"), tanto inalterados ("sanos") como alterados, con la finalidad de identificar los sitios más afectados por los procesos de intemperismo natural y/o urbano. Luego se llevó a cabo el muestreo detallado en diferentes partes alteradas de este convento con el fin de realizar diferentes tipos de análisis. En la Figura 1 se indica la ubicación en planta de los diferentes bloques donde se obtuvieron las

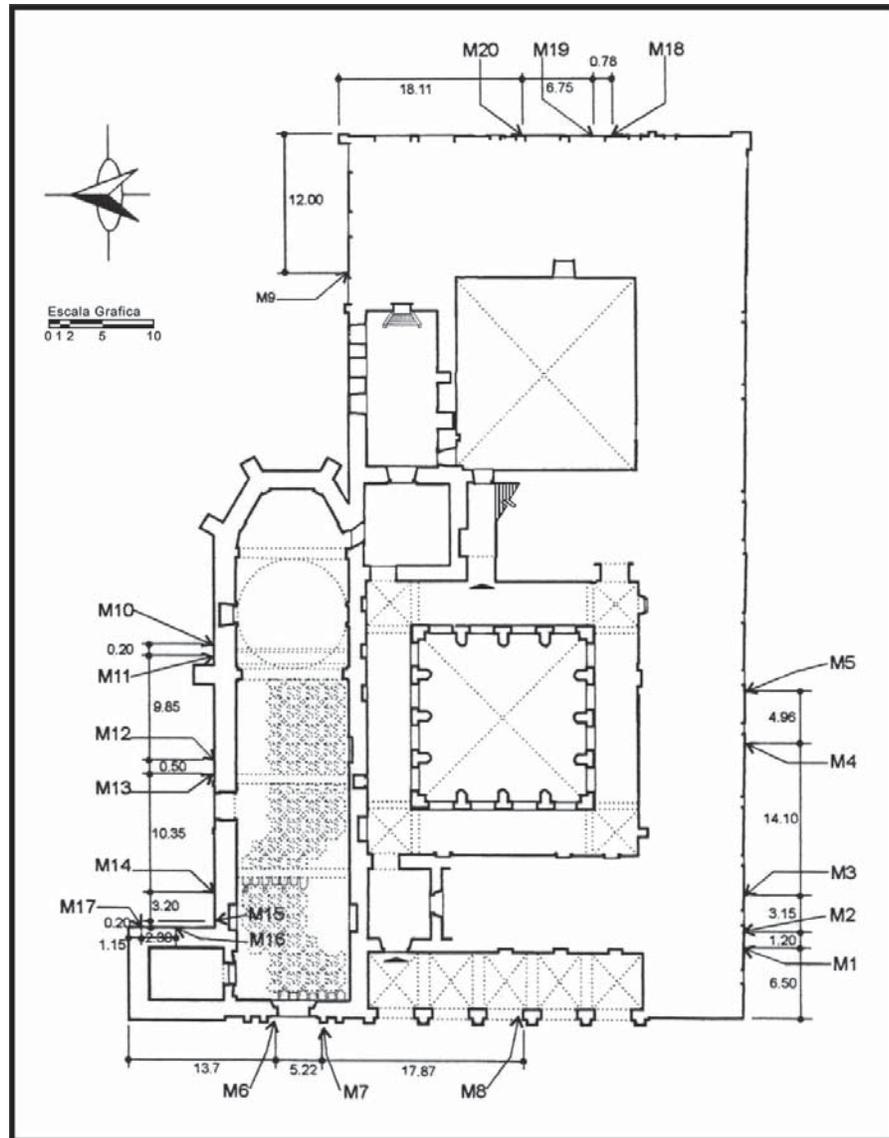


Figura 1. Plano del Exconvento San Francisco (Morelia, Michoacán), en el que se muestra la ubicación de los diferentes bloques donde se obtuvieron núcleos de cantera para el presente estudio (M1-M20).

muestras de estudio en forma de núcleos.

La extracción de los núcleos de cantera del complejo arquitectónico de San Francisco se realizó siguiendo la siguiente metodología. El equipo que se utilizó fue una nucleadora conformada por una motosierra transformada y una broca cilíndrica con punta de diamante de 2.54 x 17.78 cm. Para extraer la muestra fue necesario realizar un corte en forma perpendicular a la cara de la mampostería, y, debido a que la nucleadora sólo realiza el corte en la periferia del núcleo, extraer posteriormente el núcleo que se mantiene dentro del orificio. Las muestras finales para el estudio fueron cilindros de dimensiones promedio de 2 cm de diámetro y 8 cm de largo. Cabe destacar que muchos de los núcleos se obtuvieron en forma fragmentada en dos o más partes, porque al ir penetrando la herramienta de corte se

encontró con incrustaciones de pómez o fracturas que, ante el esfuerzo, se fracturaron rápidamente. Las muestras para los diferentes estudios fueron recolectadas de las partes superficiales (alteradas) y centrales (inalteradas) de esos núcleos. Según la evaluación realizada, la profundidad de alteración es bastante pequeña (unos 2–3 mm) en la mayoría de las muestras obtenidas y sólo en algunas muestras (M-6) alcanza 3–5 mm.

Paralelamente a la extracción de los núcleos sólidos se colectaron polvos provenientes de la parte superficial de la mampostería del Exconvento con el fin de estudiar la sección más afectada por los procesos de intemperismo y degradación. En total se investigaron 20 muestras (M-1 a M-20) que fueron recolectadas en diferentes partes del Exconvento de San Francisco (Figura 1). En un reciente

estudio, los geólogos de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Garduño *et al.*, 1999) han establecido que las ignimbritas que se usaron en la construcción del centro histórico de Morelia tuvieron su origen en la depresión de Atécuaro, localizada al sur de la ciudad. Se recolectaron también muestras de esta depresión para compararlas con las muestras del Excovento de San Francisco.

## CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA BREVE DE LAS IGNIMBRITAS

El Estado de Michoacán es sin duda una de las áreas más representativas del vulcanismo del Cinturón Volcánico Mexicano; tan sólo en el Corredor Tarasco se alojan más de 1,000 conos formados por vulcanismo monogenético (Garduño *et al.*, 1999), además de ser la sede del surgimiento de los dos volcanes más recientes de México, el Jorullo (1759) y el Parícutín (1943).

La depresión de Atécuaro se localiza en un edificio andesítico, cuyas lavas han sido fechadas en 13 Ma, que posee en su cima una estructura caldérica con un radio de aproximadamente 3 kilómetros y desniveles de 100 metros. En la parte exterior de la misma se observan depósitos de co-ignimbritas (brechas) que confirman las facies proximales de la destrucción del edificio andesítico. Esta co-ignimbrita descansa sobre rocas andesíticas del Mioceno que se encuentran muy fracturadas y alteradas. En el núcleo y los bordes internos de la caldera, la andesita está aún más alterada por lo que las estructuras de erosión son más espectaculares. Sobre esta brecha de explosión descansan flujos piroclásticos de composición riolítica (“Cantera” de Morelia), presentando variaciones tanto horizontales como laterales. Los afloramientos más importantes son los de Cointzio, los del Río Chiquito y los del centro histórico de Morelia. Estos flujos piroclásticos han sido fechados en 12 Ma (Mioceno medio–superior). Los niveles de ignimbrita más utilizados para construir los edificios históricos más representativos de la Ciudad de Morelia fueron tomados de la parte superior de la secuencia de flujos piroclásticos, correspondiendo a los productos más soldados.

La composición mineralógica de estas rocas todavía no está bien estudiada. De acuerdo con algunos datos bibliográficos (Demant, 1978), las rocas piroclásticas del Eje Volcánico Transmexicano presentan, en términos muy generales, composición riolítica a riodacítica, y se caracterizan por tener una matriz pumítica devitrificada con la aparición de un mosaico del cuarzo, plagioclasa de composición ácida a media, sanidino, cristobalita, tridimita, en menor proporción biotita, y en algunos casos piroxeno y hornblenda. En esta matriz se encuentran fenocristales de los mismos minerales. La naturaleza, dimensiones y abundancia de los fenocristales son muy variables. Los típicos minerales accesorios son apatita y zircón. En algunos casos se observan cristales de los minerales opacos (óxidos):

magnetita, hematita, ilmenita. Estas rocas piroclásticas se distinguen por las siguientes particularidades petrográficas: a) textura típica vitroclástica, caracterizada por la presencia de fragmentos de vidrio volcánico, que por cierto predominan en las muestras estudiadas; y b) estructura eutaxítica que se compone de bandas micro- y criptocristalinas, y vítreas.

## TÉCNICAS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

Con el objetivo de determinar las características principales petrográficas, mineralógicas y geoquímicas de las ignimbritas estudiadas se utilizaron las siguientes técnicas analíticas:

1) observación petrográfica en láminas delgadas utilizando un microscopio óptico de polarización (Olympus BX50) con aumentos hasta de  $\times 125$ ;

2) análisis químicos por fluorescencia de rayos X (Espectrómetro marca Bruker SRS3000 usando 35 muestras internacionales de referencia para las curvas de calibración);

3) análisis por difracción de rayos X (difractómetro Siemens 5000, con radiación monocromática de Cu K $\alpha$ ,  $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ , con 30 kV y 25 mA, con una constante de tiempo 0.6–1.0 segundos y una constante de paso angular 0.02 grados para  $2\theta$ ); en el estudio difractométrico de polvos provenientes de la parte superficial de la mampostería del Excovento se realizó la preparación de las muestras orientadas naturales y tratadas;

4) observación y estudio en un microscopio electrónico de barrido (MEB), modelo JSM 64000, marca JEOL, con un alcance de 300,000 magnificaciones, diámetro del haz de electrones de  $10^{-2}$  a  $10^{-5} \text{ \AA}$ , y con resolución a 35 kV, con microanálisis por espectrómetro de dispersión de energía (EDS). Las muestras de ignimbrita se espolvorearon directamente sobre un portamuestras de aluminio recubierto por una capa adhesiva de carbón para posteriormente ser recubiertas con una película de cobre, con un espesor aproximado de 10  $\text{\AA}$ . Debido a la alta resolución del microscopio electrónico debe tenerse gran precaución para minimizar la contaminación de muestras y el daño debido a la irradiación por el haz de electrones.

## RESULTADOS

### Microscopía óptica

La observación de las secciones delgadas de todas las muestras estudiadas procedentes de las formaciones piroclásticas primarias han mostrado que ellas están constituidas por: 1) materiales vítreo, y en algunos casos vesicular, con inclusiones de material lítico (fragmentos de roca piroclástica); 2) fenocristales de sanidino, plagioclasa de composición principalmente ácida a media (oligoclasa–andesina), tres formas cristalinas de sílice (cuarzo,

crystalita y tridimita) y plaquetas de biotita. Por lo general, todos estos fenocristales están agrietados y corroídos, y prácticamente no se observaron los individuos enteros bien definidos. Los fenocristales están incluidos en la masa hipocrystalina del vidrio volcánico. En algunos casos se observan, con las magnificaciones altas, zonas con numerosos fragmentos y trozos de diferente morfología (angulosa, curva, media luna, en forma de “Y” y/o irregular) distribuidos de forma heterogénea en la masa hipocrystalina. Los minerales secundarios son la sericita, clorita, zeolitas, hidróxidos de hierro, zircón y leucoxeno.

La textura típica de las muestras estudiadas es litocristaloclastica, en la cual predominan los fenocristales y sus fragmentos distribuidos en una matriz afanítica vítrea y/o devitrificada (hipocrystalina); los fragmentos de pómez y otros fragmentos de rocas piroclásticas se observan en cantidad subordinada y con distribución uniforme, lo que determina el aspecto visible de compactación. En algunos casos se observan todas las gradaciones entre las texturas lito-, cristal- y vitroclásticas. En zonas que contienen vidrio fresco se observan las texturas vítrea y fluida.

El vidrio volcánico es el componente característico de estas tobas soldadas, con un contenido que oscila entre 25 y 75%. Este constituyente se caracteriza por presentar diferente grado de devitrificación, el cual está relacionado con la intensidad del proceso de su transformación secundaria. Se conoce que la devitrificación es el proceso de transformación del vidrio volcánico en estado sólido a un agregado criptocristalino de minerales, en el cual no se observan individuos cristalinos bien definidos bajo el microscopio óptico.

En algunas zonas de devitrificación se observan microlitos que se distinguen por su morfología; más se encuentran los espoculitos (“ramas”) y triquitos (“gusanos”). Además, en algunos casos se observan fragmentos de vidrio fresco en cuyos bordes han cristalizado sanidino y cristobalita fibrosos, de modo que las aureolas consisten en fibras cristalinas con arreglo perpendicular mientras que los núcleos permanecen hialinos e isótropos. A este nivel no se observa alguna fase mineral que pudiera apuntar a un proceso específico de alteración de las ignimbritas primarias.

En suma, las muestras estudiadas presentan alrededor de 20% de feldespatos (sanidino, plagioclasa ácida a media), 20–25% de vidrio volcánico fresco, 25–75 % de fragmentos vítreos (devitrificados), así como 5–10 % de otros componentes (fenocristales de otras fases minerales y algunas formaciones líticas).

### Fluorescencia de rayos X

El estudio geoquímico de las ignimbritas no alteradas procedentes de la caldera de Atécuaro ha mostrado un cierto número de problemas específicos que están relacionados con la representatividad de las muestras, pues en ellas se

observan litologías de diferente origen (tobas de diferente grado de soldamiento, pómez, obsidiana, presencia de xenolitos, procesos de hidratación secundaria, etc.). Los resultados obtenidos para las muestras de las tobas soldadas muestran variaciones amplias en el contenido de los elementos principales.

Por ejemplo se puede indicar que, entre los elementos mayores, el contenido del SiO<sub>2</sub> varía de 68 a 79% (Tabla 1), lo que está relacionado con las variaciones en la composición mineralógico-petrográfica de estas rocas volcánicas. De acuerdo con Soloviev (1976), estas ignimbritas corresponden a rocas con alto contenido de Al (normativas en corindón, pertenecientes a una serie potásica-sódica) las cuales, además, contienen más potasio, titanio y menos hierro que las rocas riolíticas metaluminosas.

Además, elementos traza como Rb, Sr, Ba y Zr se presentan en menor abundancia. Los tres primeros elementos son impurezas típicas en feldespato potásico (sanidino) mientras que el zirconio se encuentra formando una fase mineral propia (zircón).

Tabla 1. Análisis de muestras de ignimbrita del Exconvento San Francisco en comparación con una ignimbrita fresca. Determinación de elementos mayores y traza por fluorescencia de Rayos X con la determinación especial de S y Cl.

| Óxidos y elementos                 | Ignimbrita fresca (Atécuaro) | M-6         | M-10   | M-17   |
|------------------------------------|------------------------------|-------------|--------|--------|
|                                    |                              | (% en peso) |        |        |
| SiO <sub>2</sub>                   | 71.55                        | 69.61       | 70.65  | 63.93  |
| TiO <sub>2</sub>                   | 0.47                         | 0.15        | 0.14   | 0.17   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 13.62                        | 11.44       | 11.78  | 10.92  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 2.92                         | 0.86        | 1.72   | 1.67   |
| MnO                                | 0.06                         | 0.02        | 0.02   | 0.03   |
| MgO                                | 0.27                         | 0.37        | 0.18   | 1.34   |
| CaO                                | 1.14                         | 3.73        | 1.46   | 7.03   |
| Na <sub>2</sub> O                  | 4.00                         | 2.64        | 3.27   | 2.76   |
| K <sub>2</sub> O                   | 4.01                         | 4.17        | 4.59   | 3.68   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>      | 0.04                         | 0.52        | 0.03   | 0.16   |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>      | 2.18                         | 4.94        | 6.18   | 8.78   |
| S                                  | -                            | 2.17        | 0.51   | 0.68   |
| Cl                                 | -                            | 0.11        | 0.24   | 0.06   |
| Suma                               | 100.26                       | 100.73      | 100.77 | 101.21 |
|                                    |                              | (ppm)       |        |        |
| Rb                                 | 400                          | 139         | 149    | 141    |
| Sr                                 | 440                          | 182         | 84     | 104    |
| Ba                                 | 270                          | 787         | 618    | 634    |
| Y                                  | 255                          | 30          | 28     | 26     |
| Zr                                 | 120                          | 143         | 117    | 122    |
| Th                                 | 12                           | 15          | 17     | 14     |
| Pb                                 | 41                           | 33          | 23     | 39     |
| K/Rb                               | 100.2                        | 300         | 308    | 261    |
| Rb/Sr                              | 0.9                          | 0.76        | 1.77   | 1.35   |
| Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O | 0.99                         | 0.63        | 0.71   | 0.75   |

Nota: El análisis fue realizado con el programa RUIZF1.QAN, excepto S y Cl, que fueron medidos en muestra prensada usando el programa SEMIQNT.

En las muestras alteradas del Exconvento, el contenido de  $\text{SiO}_2$  varía de 63.93 hasta 73.02 % en peso, lo que está relacionado con las mismas variaciones que hemos indicado anteriormente para las muestras frescas. Para caracterizar el comportamiento geoquímico de la alteración en las ignimbritas estudiadas se normalizaron los contenidos de óxidos mayores y elementos traza de las ignimbritas alteradas del Exconvento contra la composición de una ignimbrita sin efectos de alteración de la cantera (Figura 2). Las ignimbritas alteradas presentan un empobrecimiento relativo en  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y  $\text{Na}_2\text{O}$ , y un enriquecimiento en  $\text{CaO}$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Entre estos últimos óxidos, el calcio se enriquece entre tres y seis veces respecto a la roca fresca. En algunas muestras alteradas, el fósforo se enriquece entre cuatro y doce veces respecto a la ignimbrita no alterada.  $\text{SiO}_2$  y  $\text{MnO}$  permanecen prácticamente sin variaciones. La relación  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  en las ignimbritas es de aprox. 1, mientras que en las rocas alteradas es de 0.63–0.75, indicando un ligero enriquecimiento en  $\text{K}_2\text{O}$ .

Finalmente, en las muestras estudiadas del Exconvento se determinaron azufre y cloro, dos elementos con elevada concentración que no son típicas para este tipo

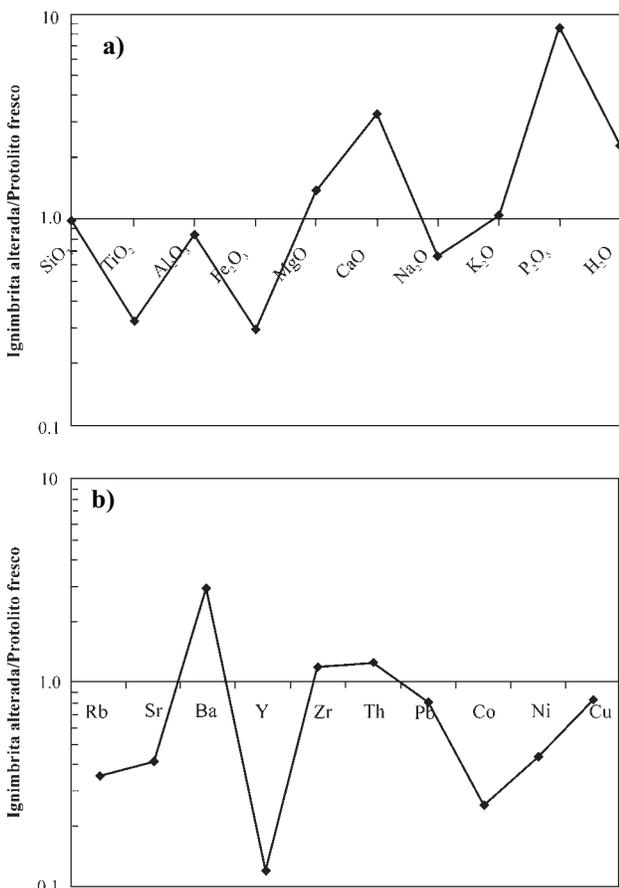


Figura 2. Composición de una ignimbrita alterada (muestra M-6) normalizada contra la composición estimada promedio de una ignimbrita no alterada. a) elementos mayores; b) elementos traza.

de rocas volcánicas. Así, las muestras alteradas se caracterizan por el enriquecimiento en azufre de hasta dos veces respecto a la ignimbrita no alterada. En el proceso de alteración de las ignimbritas disminuye la concentración de elementos traza como Rb, Sr, Y y Pb, mientras que se incrementa la abundancia de elementos como Ba y Zr.

El análisis por fluorescencia de rayos X de elementos mayores sin la determinación especial de S y Cl (Tabla 2) muestra las mismas tendencias en el cambio de las concentraciones de todos los elementos indicados anteriormente, en particular, de elementos tales como calcio y fósforo. En este caso, la suma total de los óxidos es muy inferior al 100%, debido a que no fueron determinados dos elementos importantes en las ignimbritas alteradas: azufre y cloro.

### Difracción de Rayos X

Los resultados que arrojan los difractogramas de las muestras del Exconvento de San Francisco indican que los minerales esenciales de las muestras analizadas son: feldespatos de diferente naturaleza (sanidino y plagioclasa de composición ácida–media = oligoclasa–andesina), y tres formas cristalinas de sílice (cuarzo, cristobalita y tridimita). Además, los datos difractométricos muestran la presencia escasa de los filosilicatos biotita, montmorillonita y haloisita.

Por otra parte, los estudios de difracción de rayos X permitieron confirmar por primera vez en una serie de muestras del Exconvento (M-1, M-2, M-6 y M-20), la presencia de nuevas fases minerales (llamadas neoformaciones) que no son características de las rocas volcánicas de este tipo. Entre estos minerales llama la atención la formación de sulfatos y carbonatos de calcio: yeso, calcita y muy rara vez ankerita (Tabla 3). Tomando

Tabla 2. Análisis de las partes alteradas y no alteradas en los núcleos extraídos. Determinación de elementos mayores por fluorescencia de Rayos X sin la determinación especial de S y Cl. Concentraciones en % en peso.

| Óxidos                  | M-19        | M-20             | M-1              |
|-------------------------|-------------|------------------|------------------|
|                         | No alterada | Muestra alterada | Muestra alterada |
| $\text{SiO}_2$          | 64.86       | 61.27            | 59.15            |
| $\text{TiO}_2$          | 0.16        | 0.14             | 0.18             |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 11.16       | 11.61            | 11.11            |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 2.01        | 1.47             | 1.81             |
| $\text{MnO}$            | 0.03        | 0.02             | 0.06             |
| $\text{MgO}$            | 0.20        | 0.13             | 1.62             |
| $\text{CaO}$            | 1.68        | 3.84             | 5.48             |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 3.73        | 3.17             | 2.94             |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 4.95        | 4.29             | 3.43             |
| $\text{P}_2\text{O}_5$  | 0.54        | 0.42             | 0.93             |
| $\text{H}_2\text{O}^+$  | 7.82        | 11.12            | 9.32             |
| Suma                    | 97.14       | 97.48            | 96.03            |

en cuenta este hecho se les puede considerar como las primeras fases indicadoras del proceso de alteración específica urbana de las ignimbritas morelianas.

La difracción de los rayos X confirma la presencia de todos los minerales observados por la microscopía óptica. Por otro lado, esta técnica ha revelado la formación de algunas fases minerales que están relacionadas con el intemperismo de los minerales primarios de las rocas estudiadas.

## MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Se conoce que la microscopía electrónica permite estudiar las particularidades superfina de la morfología de partículas pequeñas (formas y tamaños reales) de minerales, y, en particular, la estructura de los agregados minerales finamente dispersos, criptocristalinos y amorfos (minerales arcillosos, hidróxidos de hierro, neoformaciones, etc.).

La microscopía electrónica de barrido ha corroborado la presencia de los minerales de neoformación (yeso, carbonatos y minerales arcillosos) que anteriormente se habían encontrado mediante difracción de rayos X (Figura 3 a). Además, de acuerdo con datos de la microscopía electrónica de barrido se observaron cristales e individuos minerales de otras dos fases: halita (NaCl) y fosfatos de una naturaleza hasta hoy día bastante incierta (Figura 3 b, c). Las últimas formaciones se encuentran en forma de esferas que muy probablemente se han originado por contaminación urbana.

Es muy importante hacer notar que los análisis químicos realizados con la ayuda de esta técnica muestran las mismas tendencias en el cambio de concentraciones de los elementos mayores y traza para las muestras con diferente grado de alteración (Tabla 4). Así, en las muestras con alto grado de alteración respecto a las muestras no alteradas se observa un enriquecimiento fuerte en  $\text{SO}_3$  (hasta 17 veces) y Cl (hasta 32 veces), lo que confirma los datos obtenidos por la fluorescencia de rayos X.

Por lo tanto, la utilización de MEB ha complementado la información ya obtenida por otras técnicas analíticas y, además, ha permitido establecer la presencia de varias fases minerales exóticas que se han formado en las ignimbritas como resultado del intemperismo urbano.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación en laboratorio mostraron que el material original de las rocas volcánicas estudiadas está constituido principalmente de fenocristales de cuarzo, plagioclasas, feldespatos potásicos, cristobalita, tridimita, biotita, fragmentos de vidrio volcánico con diferente grado de devitrificación, y de inclusiones líticas.

Se conoce que cada mineral constituyente de las rocas se altera de diferente manera: el cuarzo es muy estable y

sumamente resistente al intemperismo químico, por lo cual prácticamente no se altera; los feldespatos, sobre todo la plagioclasa, al intemperizarse dan lugar principalmente a la formación de minerales arcillosos, cuarzo e iones en solución. Además, estas fases minerales se caracterizan por mostrar diferente velocidad de la alteración. Por lo tanto, es obvio que en cada caso concreto hay que considerar la composición mineralógica de las rocas no alteradas para entender los procesos de alteración y sus mecanismos específicos.

En el caso de las ignimbritas estudiadas, los resultados indican dos procesos naturales de alteración: 1) formación de minerales arcillosos como resultado de la meteorización de los fenocristales de feldespato de diferente composición inmersos en la matriz vítrea; y 2) proceso de devitrificación, que es la transformación del vidrio volcánico en el estado

Tabla 3. Datos de las líneas de difracción de rayos X (Å) de la muestra alterada M-6.

| Muestra M-6<br>Líneas en Å | Snd   | Pl    | Q     | Gyp   |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 7.553                      |       |       |       | 7.56  |
| 6.313                      |       | 6.32  |       |       |
| 4.259                      |       |       | 4.26  | 4.27  |
| 4.172                      | 4.16  |       |       |       |
| 4.031                      |       | 4.04  |       |       |
| 3.910                      | 3.91  | 3.89  |       |       |
| 3.755                      | 3.76  | 3.75  |       | 3.79  |
| 3.656                      |       | 3.64  |       |       |
| 3.440                      | 3.45  | 3.43  |       |       |
| 3.334                      |       |       | 3.343 |       |
| 3.281                      | 3.27  | 3.26  |       |       |
| 3.252                      | 3.26  |       |       |       |
| 3.238                      | 3.22  | 3.23  |       |       |
| 3.203                      |       | 3.20  |       |       |
| 3.180                      |       | 3.18  |       |       |
| 3.142                      |       | 3.14  |       |       |
| 3.035                      |       | 3.02  |       | 3.06  |
| 2.976                      | 2.97  | 2.95  |       |       |
| 2.897                      |       |       |       |       |
| 2.847                      |       |       |       | 2.86  |
| 2.754                      | 2.76  |       |       |       |
| 2.670                      |       | 2.66  |       | 2.679 |
| 2.564                      | 2.56  |       |       |       |
| 2.512                      |       | 2.51  |       |       |
| 2.483                      |       | 2.47  |       |       |
| 2.278                      |       |       | 2.28  |       |
| 2.159                      | 2.167 |       |       |       |
| 2.126                      |       | 2.130 |       |       |
| 2.090                      |       |       |       | 2.08  |
| 1.815                      |       |       | 1.817 |       |
| 1.786                      |       | 1.795 |       |       |
| 1.669                      |       |       | 1.672 |       |
| 1.619                      |       | 1.627 |       |       |
| 1.540                      |       |       | 1.541 |       |

Notas: 1) Snd=Sanidina, Pl=Plagioclasa (Oligoclasa-Andesina), Q=Cuarzo, Gyp=Yeso; 2) En las muestras estudiadas se indicaron también los máximos característicos de otras fases minerales: calcita, ankerita, cristobalita, tridimita, montmorilonita, y haloisita.

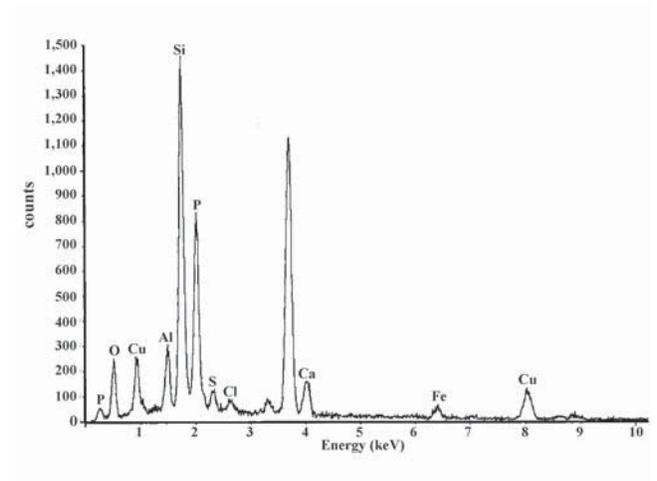
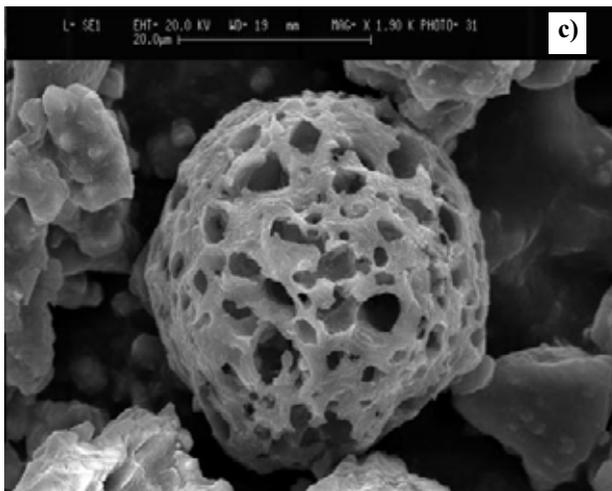
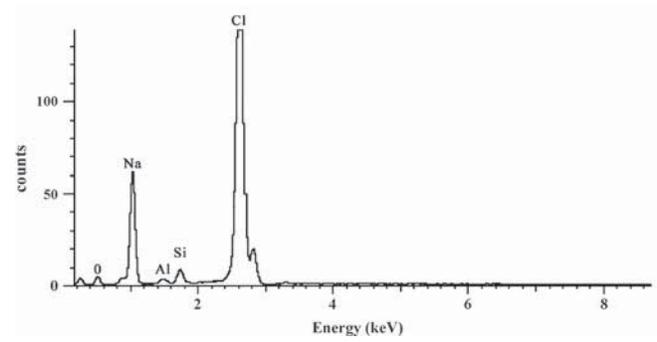
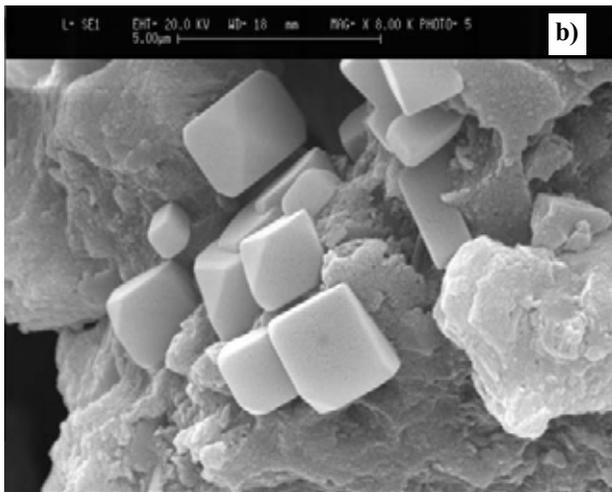
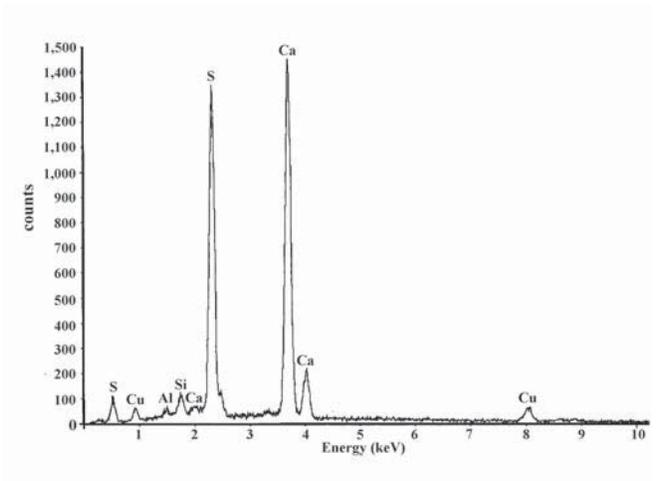
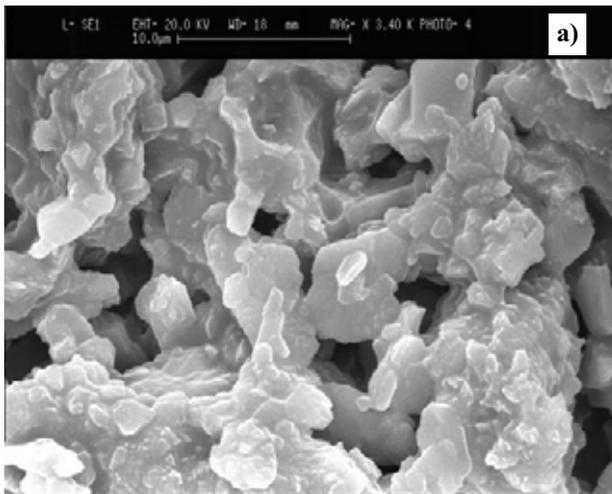


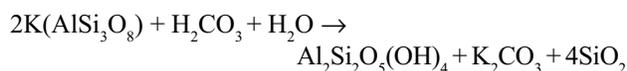
Figura 3. Fotomicrografías de MEB y determinación de componentes en una partícula: a) cristales de yeso:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (M-1); b) cristales de halita:  $\text{NaCl}$  (M-10); c) esferas de fosfato de calcio (M-6).

Tabla 4. Resultados del análisis con espectrómetro de dispersión de energía (EDS) en muestras no alteradas y alteradas. Concentración en % en peso.

| Óxidos y elementos             | M-19<br>No alterada | M-16<br>Muestra alterada | M-17<br>Muestra alterada |
|--------------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 68.16               | 58.09                    | 62.19                    |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.23                | 0.14                     | 0.59                     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17.84               | 17.32                    | 17.02                    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -                   | 1.74                     | 1.51                     |
| CaO                            | 1.33                | 4.96                     | 3.59                     |
| Na <sub>2</sub> O              | 6.93                | 4.75                     | 4.42                     |
| K <sub>2</sub> O               | 4.91                | 5.69                     | 6.24                     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.16                | 0.52                     | 0.46                     |
| SO <sub>3</sub>                | 0.23                | 3.91                     | 1.35                     |
| Cl                             | 0.12                | 3.90                     | 3.19                     |
| Suma                           | 99.91               | 101.02                   | 100.56                   |

sólido a un agregado criptocristalino de minerales.

Para el intemperismo de feldespatos son esenciales dos sustancias: bióxido de carbono y agua. Cuando los feldespatos se ponen en contacto con agua que contiene al ácido débil H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (ácido carbónico), el resultado es la formación de minerales arcillosos (halosita y/o montmorillonita), carbonatos de potasio, sodio o calcio, y ciertas cantidades de sílice como se indica, a modo de ejemplo, en la siguiente reacción:



En las condiciones de intemperismo urbano, el material pétreo estudiado del Exconvento de San Francisco se caracteriza principalmente por dos tipos de alteración secundaria de baja escala: pátinas de cantera con minerales arcillosos (montmorillonita y haloisita), y costras de alteración formadas por una asociación mineralógica exótica –sulfatos, cloruros, fosfatos y carbonatos. Las fases minerales indicadoras de los procesos de degradación son las siguientes: yeso, halita, calcita, ankerita y microesférulas de fosfato de calcio amorfo. La presencia de estas fases indican de manera bastante obvia que los principales elementos indicadores de alteración en los edificios históricos estudiados del Exconvento San Francisco son azufre, cloro y fósforo.

Al respecto de los fosfatos, que se identificaron sólo con la ayuda de la microscopía electrónica, se supone que estas formaciones tienen posiblemente origen industrial o provienen de la contaminación atmosférica. Se conoce que la aplicación más importante de estos compuestos en la industria es como base (builder), sustancia química de los detergentes, siendo el más utilizado el tripolifosfato de sodio (Na<sub>5</sub>PO<sub>10</sub>). El mismo compuesto también es utilizado en la industria de los fertilizantes, en la producción de ácidos fosfóricos, de fósforo y de alimentos para animales. Es muy

probable que estas partículas se hayan formado por la combustión de carbón o de madera.

El mecanismo de formación de las fases minerales recientes y de otros productos en los procesos de alteración de los edificios y monumentos históricos puede ser diferente para materiales con diferente composición. Así por ejemplo, en este caso concreto, la génesis de sulfatos se explica por la reacción entre los fenocristales de plagioclasa (con composición ácida–media; oligoclasa–andesina) con ácido sulfúrico que da lugar a la formación de sulfatos de calcio hidratados con los aniones complementarios.

Finalmente, sería conveniente subrayar que en diversos tipos de las rocas piroclásticas con distinto contenido de vidrio volcánico se desarrolla, como regla, el proceso de devitrificación. Así, el vidrio de algunas ignimbritas ha cristalizado (devitrificado) a agregados criptocristalinos de sanidino, cristobalita, tridimita y oligoclasa, mientras que los poros han sido rellenos con cristobalita, tridimita y hematita. En otros tipos de ignimbritas, el vidrio ha sido reemplazado por mezclas félsicas densas de cuarzo y sanidino o plagioclasa ácida. Al mismo tiempo, se observan ignimbritas con vidrio relativamente fresco (no devitrificado) o algunas que presentan menor grado de devitrificación. Por lo tanto, es bastante obvio que las ignimbritas que presentan un soldamiento de alto grado en la matriz se caracterizan por tener mejores propiedades mecánicas y una resistencia considerablemente mayor a los procesos de intemperismo.

En suma, los resultados obtenidos permiten concluir lo siguiente:

1) El estudio de todas las muestras obtenidas en el Exconvento de San Francisco (Centro Histórico, Morelia, Michoacán) arroja datos muy semejantes con respecto a su composición mineralógica, particularidades geoquímicas y procesos de alteración. La composición mineralógica de las ignimbritas no alteradas se caracteriza por la presencia de diferentes fases minerales, principalmente silicatos (sanidino, oligoclasa–andesina, micas) y óxidos (cuarzo, cristobalita, tridimita, hematita) que se encuentran en forma de fenocristales.

2) Se distinguen dos tipos de alteraciones que se desarrollan en diferentes condiciones de formación, tanto naturales (principalmente, devitrificación) como urbanas (neoformaciones en monumentos históricos). Estas últimas se caracterizan por una intensidad relativamente baja (la profundidad de alteración urbana no supera los 3–5 mm) y están relacionadas principalmente con las particularidades petrográficas, mineralógicas y geoquímicas de las ignimbritas primarias de la cantera.

3) El proceso de degradación de las ignimbritas en los monumentos históricos estudiados dió lugar a la formación de dos tipos principales de agregados que se relacionan con una alteración secundaria de baja escala: a) pátinas de cantera con minerales arcillosos (montmorillonita y haloisita); y b) neoformaciones minerales entre las cuales predominan los sulfatos (yeso), cloruros (halita), fosfatos

de calcio amorfos y, en menor proporción, carbonatos (calcita y ankerita). Esta composición mineralógica muestra que los principales elementos indicadores de alteración reciente en los edificios históricos estudiados son azufre, cloro y fósforo.

4) En las ignimbritas estudiadas llama la atención el diferente (menor o mayor) grado de devitrificación pues es obvio que la menor intensidad y/o ausencia de este proceso de devitrificación es característica de las ignimbritas que presentan buena consolidación y mejores propiedades de resistencia mecánica a los procesos de intemperismo.

Finalmente se puede decir que los resultados aquí expuestos aportan nuevos datos a la mineralogía de las formaciones minerales recientes (Ostroumov, 2001) que son características de los procesos de degradación en los monumentos históricos en Morelia, Michoacán (México). Estos datos a su vez, podrán servir en un futuro estudio sistemático de los conjuntos arquitectónicos, no sólo en la ciudad de Morelia sino también en otras ciudades de la República Mexicana que son consideradas en el mundo como patrimonio de la humanidad.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su sincero agradecimiento a dos árbitros anónimos por sus valiosos y constructivos comentarios sobre el trabajo, y por sus recomendaciones que fueron tomadas en cuenta por los autores. Los autores agradecen también a M.C. Kimberly Anne Brooks-Lewis su ayuda en la redacción del resumen en inglés.

## REFERENCIAS

Carroll, D., 1971, *Rock weathering*: New York, Plenum Press, 203 p.  
 Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 2 (2), 172-187.

Franzini, M., 1995, Stones in monuments; natural and anthropogenic deterioration of marble artifacts: *European Journal of Mineralogy*, 7, 735-743.  
 Garduño-Monroy, V.H., Corona-Chávez, P., Israde-Alcantara, I., Mennella, L., Arreygue-Rocha, E., Bigioggero, B., Chiesa, S., 1999, Carta Geológica de Michoacán, escala 1:250,000: México, Universidad Michoacaca de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y Departamento de Geología y Mineralogía, 111 p.  
 López-Acevedo Cornejo V., Algaba-Suarez, M., García-Romero, E., Martín-Vivaldi Caballero, J.L., Soutullo-García, B., 1997, Estudio de las alteraciones en el claustro principal del Monasterio del Paular: España, Comunidad Autónoma de Madrid, Universidad Complutense, 23 p.  
 Marfunin, A., 1998, *Advanced Mineralogy*: Berlin, Springer-Verlag, v. III, 544 p.  
 Ostroumov, M., 2001, Mineralogía Avanzada en México: conceptos, resultados, investigaciones futuras: *Boletín de la Sociedad Mexicana de Mineralogía*, 14 (1), 7-16.  
 Prada-Pérez, J.L., Álvarez-Pérez, A., 1997, Mineralogía de los procesos de degradación de edificios históricos, *en* Melgarejo J.C. (ed.), *Atlas de Asociaciones Minerales en Lámina Delgada*: España, Edicions Universitat de Barcelona, 433-441.  
 Sánchez-Navas, A., Cardell, C., García-Ruiz, J., 1992, Conservation study of ornamental tiles of the "Hospital de San Juan de Dios" cloister (Granada, Spain), *in* Delgado-Rodriguez, J., Henriques F., Telmo-Jeremias, F. (eds.), *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, June 1992: Portugal, Lisboa, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, 1527-1544.  
 Soloviev, S., 1976, Particularidades geoquímicas de las rocas magmáticas: Leningrado, Ed. Nauka, 234 p. (en ruso).

Manuscrito recibido: Abril 10, 2003  
 Manuscrito corregido recibido: Septiembre 9, 2003  
 Manuscrito aceptado: Septiembre 12, 2003