

TEMA 6: METEORIZACION Y CLIMA

1. PROCESOS DE ALTERACION

El deterioro de los materiales que constituyen un objeto cualquiera en el medio ambiente atmosférico, por ejemplo una obra de arte, es un proceso natural, progresivo e irreversible (i.e., , imparabile), que conduce inevitablemente a la destrucción del material. Esto es debido a la tendencia natural de las sustancias a equilibrarse (hablando en términos físico-químicos) con el medio ambiente en que se encuentran, lo cual implica que se disparen procesos de transformación, que denominamos procesos de deterioro, que operan con mayor o menor velocidad.

Particularizando en el caso que nos ocupa del material pétreo, esta tendencia al deterioro en el medio ambiente atmosférico se debe a las diferencias físico-químicas existentes entre éste y aquel en que se formó la roca. Esto es, las variables físico-químicas como temperatura, presión, acidez (pH), potencial de oxidación-reducción (Eh), presencia y concentración de especies gaseosas (e.g. H₂O, CO₂, SO₂, SO₃...), presencia y composición de fases líquidas, etc, no son las mismas en los medios de formación y atmosférico. Esto implica que los constituyentes minerales de las rocas y su estado mecánico no son estables en las nuevas condiciones (en contacto directo con la atmósfera), tendiendo a transformarse. El resultado es que la piedra pierde sus características originales (cohesión, porosidad, microfracturación, color, mineralogía, etc).

Para evaluar los procesos de alteración, hay que tener en cuenta las propiedades del ambiente superficial atmosférico. Este se caracteriza por:

- unas condiciones cambiantes y muy variables,
- la presencia de agua en sus tres estados de agregación (sólida, líquida y gaseosa), y
- unas condiciones ambientales dinámicas, que facilita el transporte rápido de materia.

Para un mismo punto geográfico, la escala de las variaciones climáticas es tanto diurna como estacional. Este aspecto es muy importante, ya que las rocas están sometidas a condiciones ambientales muy variables a pequeña escala de tiempo (por comparación con la escala de tiempo para la formación de las rocas, que oscila entre varios miles a cientos de miles de años), lo cual conduce, por lo general, a un aceleramiento de los procesos de transformación del material original.

La presencia de agua es decisiva, ya que es un componente importante en muchas reacciones de alteración y sirve de solvente para una gran cantidad de especies químicas que interaccionan con las rocas. Además, la presencia de agua en fase líquida y gaseosa permite un rápido transporte de materia entre la roca y el medio ambiente, por lo que el proceso de degradación es continuo. Existen otras formas de transporte, tales como la propia pérdida de materia por gravedad o el intercambio debido a la acción de plantas y animales.

La circulación de soluciones acuosas por los sistemas porosos de las rocas implica la cristalización de sales solubles en el interior o exterior de los componentes pétreos. Los procesos de cristalización e hidratación/deshidratación de sales conllevan el desarrollo de importantes esfuerzos en el interior de las rocas, al igual que durante la transformación de agua a hielo, común bajo ciertas condiciones climáticas. Todos estos esfuerzos acaban por modificar las propiedades mecánicas de las rocas, que con el tiempo pierden su resistencia a la compresión y a la tracción, llegando finalmente a fracturarse.

Todas estas consideraciones pueden aplicarse por igual a las rocas que afloran de forma natural en la superficie terrestre como a las localizadas en monumentos. Sin embargo, en estas últimas hay que tener en cuenta además el efecto acelerador que sobre el deterioro de las rocas tienen las condiciones atmosféricas polucionadas de áreas urbanas e industriales. La mayor velocidad de reacción entre las rocas y los componentes de las atmósferas polucionadas se debe al hecho de que las últimas presentan elevadas concentraciones de especies químicas muy reactivas, como ácidos fuertes, y de catalizadores de las reacciones, como metales pesados y partículas en suspensión (aerosoles). Otra consideración particular aplicable a los materiales pétreos en los monumentos es la relacionada con la estabilidad estructural de los mismos. En casos de subsidencia del terreno, terremotos, o simplemente el mal diseño original de los edificios, se desarrollan esfuerzos que acaban por fracturar las fábricas y, eventualmente, causar la ruina de los edificios.

Todas estas consideraciones llevan a concluir que el deterioro de los materiales ocurre de forma rápida. Este proceso de deterioro hay que entenderlo como dinámico, esto es, su evolución depende de muchos factores cambiantes en el tiempo. Así, puede considerarse que la alteración del material que será utilizado como material de construcción u ornamentación comienza desde el momento mismo de su extracción en la cantera. Los mecanismos de extracción, manipulación, transporte y labrado ya pueden introducir modificaciones de las características originales de la roca, tales como microfisuración superficial o global de los bloques. Al mismo tiempo, los factores ambientales, como lluvia, cambios diarios de temperatura, etc, comienzan a actuar en la misma cantera, y continuarán una vez localizado el material en la obra. Con el paso del tiempo, los diferentes factores ambientales adquieren mayor o menor importancia, lo que implica que la intensidad de los distintos procesos de deterioro (controlados por estos factores ambientales) también variará con el tiempo. Así, es normal que pueda predominar uno de estos procesos, o una combinación determinada de los mismos, en distintos estadios de la historia del edificio.

A continuación se verán brevemente los factores ambientales y los agentes degradantes que condicionan los procesos de alteración, y posteriormente la tipología de estos últimos, que se establece en términos de causas *físicas* o *mecánicas*, *químicas* y *biológicas*.

2. FACTORES AMBIENTALES Y AGENTES DEGRADANTES

2.1. FACTORES AMBIENTALES

Los factores ambientales pueden definirse como el

conjunto de condiciones del medio ambiente (esencialmente atmósfera) que controlan directamente las condiciones físicas, e indirectamente las químicas y biológicas, a que son sometidos los materiales..

Los procesos de alteración están controlados tanto por estos factores, que son esencialmente climáticos, como por las características del material (composición, texturas, estructuras, etc.) que sufre la alteración.

Es lógico pensar en una estrecha relación entre alteración y clima. Los factores climáticos más importantes están relacionados con la **temperatura** y la **disponibilidad de agua** (en sus tres estados de agregación) en el medio. Otros factores climáticos pueden ser también importantes, como la presencia de vientos permanentes, dominantes o esporádicos, días de cielos cubiertos y despejados, etc. Sin embargo, los procesos de alteración más importantes de los bienes culturales son controlados esencialmente por los dos factores ambientales principales: temperatura y presencia de agua.

2.1.1. Temperatura y Agua

Las condiciones ambientales relativas a la temperatura y la presencia de agua, inherentes al clima, suelen describirse como **condiciones termohigrométricas**, que deben ser especificadas en cualquier estudio de las causas de alteración. El conocimiento de las condiciones termohigrométricas del medio implica conocer la cantidad de precipitación total, intensidad de la lluvia, cantidad de agua perdida por escorrentía, relación precipitación- evaporación, humedad del aire, temperatura media del aire, rango de variación máxima y mínima, fluctuaciones sobre el punto de helada, de rocío, etc. No obstante, una primera aproximación al clima puede obtenerse mediante la temperatura media y la precipitación media anuales.

Las variaciones de temperatura del ambiente (y en consecuencia del material) controlan directamente ciertos procesos de deterioro, en su mayoría de tipo físico o mecánico, tales como deformaciones inducidas por expansiones y contracciones térmicas del material al sufrir bruscos incrementos de temperatura, o por gelificación (transformación agua-hielo) del agua localizada en los sistemas porosos de los materiales. Pero las condiciones de temperatura y la presencia de agua en el ambiente controlan además, de forma indirecta, otros muchos procesos de alteración, tanto mecánicos como químicos o biológicos. Por poner dos ejemplos ilustrativos, la condensación del vapor de agua atmosférico puede facilitar su circulación por el material pétreo, condicionando su ataque químico, mientras que el aumento de temperatura (diurno y en la estación cálida) suele conllevar un aumento de la tasa (i.e., velocidad) de las reacciones químicas (un incremento de 10 °C puede incrementar la tasa de reacción en dos o tres veces), lo que condiciona la aceleración del deterioro del material.

Dadas las particularidades microclimáticas de los edificios (i.e., interiores vs. exteriores, caras orientadas al sur vs. caras orientadas al norte, etc.) las condiciones termohigrométricas y sus cambios a escala diaria y estacional deben referirse a las diferentes partes de la obra a considerar. Particularmente en lo que se refiere a la presencia de agua, debe conocerse la contribución de sus distintos orígenes, que son tanto “naturales” como “artificiales”:

- 1) Agua de lluvia (teniendo en cuenta los defectos en elementos constructivos evacuadores del agua, como tejas, cornisas, gárgolas, canalones, etc.).
- 2) Humedad del aire.
 - Natural.
 - [1]
 - Artificial (e.g., baños , duchas, cisternas, albercas, organismos inferiores y plantas superiores en interiores y exteriores, presencia humana en interiores, etc.).
- 3) Humedad del subsuelo.
 - Natural.
 - Artificial (e.g., riegos de jardines, patios o calles, fregado del suelo, defectos en los elementos de conducción del agua en el edificio y/o edificios adyacentes, tales como grifos, cañerías, darros, etc.).

Salvando estas las complicaciones introducidas por las condiciones microclimáticas de los edificios, pueden establecerse relaciones generales entre las condiciones termohigrométricas del medio y la intensidad y tipología de los procesos de alteración. Estas relaciones pueden observarse en diagramas temperatura media anual vs. precipitación media anual como los de la Figura 1. En estos diagramas puede apreciarse que a medida que aumenta la precipitación anual, la alteración química es más importante, debido a la mayor disponibilidad de agua. Al mismo tiempo, la alteración química también se incrementa al aumentar la temperatura debido al aumento de la velocidad de las reacciones químicas. La **alteración química** será por lo tanto mayor en **climas cálidos y húmedos**, decreciendo a mediada que la temperatura y la precipitación descenden. Aunque no se muestra un diagrama similar para la **alteración de origen biológico**, puede asumirse el anterior ya que, en general, el aumento de temperatura y de precipitación supone un aumento de flora y fauna (musgos, líquenes, algas, bacterias, etc.), y por lo tanto, las reacciones químicas relacionadas con la actividad orgánica son más abundantes y rápidas. Respecto de la **acción mecánica del hielo**, puede observarse que en zonas demasiado cálidas para que se produzcan heladas, se obtiene un mínimo, al igual que en zonas polares demasiado frías para descongelar el hielo (nótese que no está considerada la acción de la insolación como proceso de alteración mecánico). Finalmente, pueden construirse diagrama compuestos en los que se tienen en cuenta todos los tipos principales de alteración.

Estos mismos diagramas pueden ser aplicados de manera cualitativa a los procesos de alteración de materiales pétreos en monumentos. En la Figura 2, se presentan los datos pertinentes para un gran número de estaciones climáticas localizadas en nuestro entorno geográfico (i.e., Cordilleras Béticas, se excluye el valle del Guadalquivir y Sierra Morena). Aunque puede apreciarse que el clima en su conjunto es semiárido, otros factores locales, tales como condiciones microclimáticas del edificio, polución, aguas subterráneas, etc, pueden distorsionar las relaciones cualitativas entre clima y procesos de deterioro discutidas más arriba.

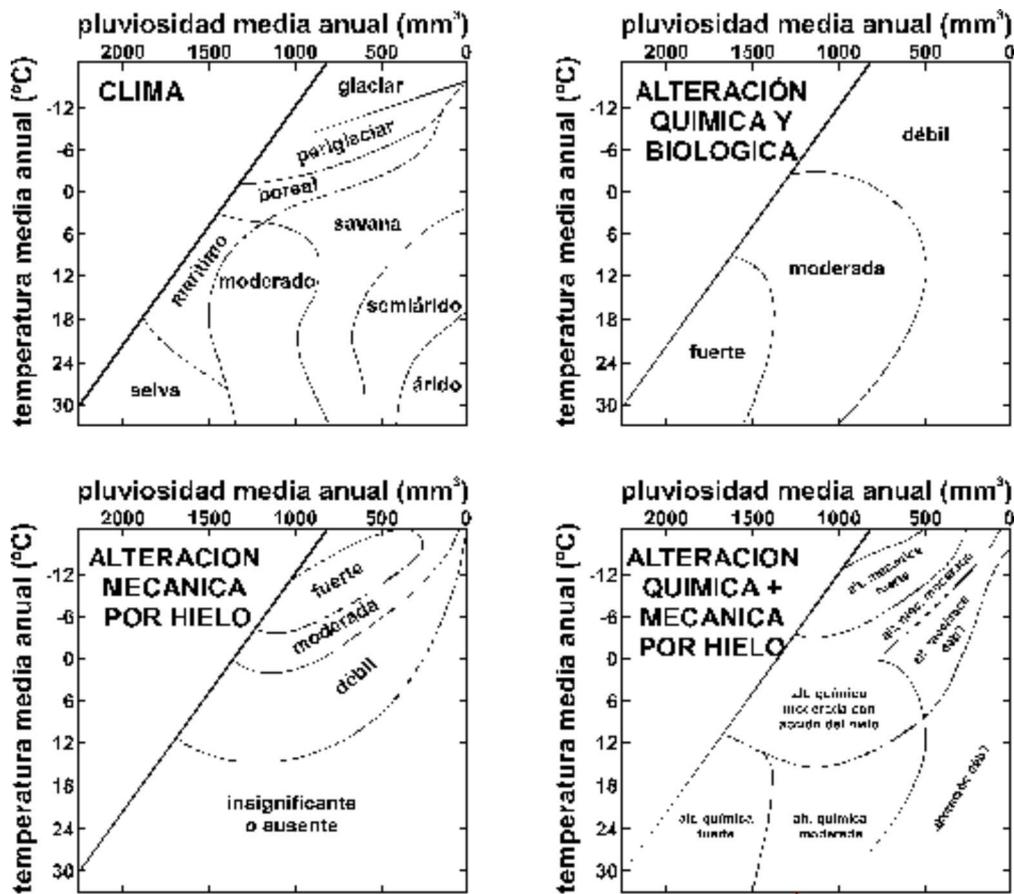


Figura 1. Diagramas temperatura media anual vs. precipitación media anual con indicación de las áreas climáticas y su relación con la intensidad de distintos tipos de alteración de rocas compuestas por silico-aluminatos (si se hubiese considerado la acción de la insolación habría que localizar un máximo de alteración mecánica en el sector inferior derecho que se corresponde con climas áridos y semiáridos) (modificado de Ollier, 1984)..

Además, los diagramas anteriores están contruidos considerando que el tipo de roca que sufre la alteración presenta una composición mineral rica en silicoaluminatos (e.g., granitos). Puesto que las rocas carbonatadas son muy frecuentes como material de construcción y ornamentación, es importante tener en cuenta los factores ambientales y agentes degradantes que condicionan los procesos de alteración de las mismas. A este respecto, puede decirse que los factores termohigrométricos son igualmente decisivos como controles de la alteración, aunque dada la especificidad composicional del material (carbonatos de Ca y Mg) el control no es idéntico al hasta ahora visto. Por ejemplo, el aumento de la velocidad de reacción debido a un aumento de temperatura en el proceso de disolución de la calcita se ve descompensado por el descenso de la solubilidad de CO_2 en el agua (al aumentar T), lo cual implica que, independientemente de otros factores como la actividad orgánica, la alteración de un material calizo sea más intensa en climas húmedos y fríos, y no en los cálidos. Estos aspectos serán analizados más detalladamente en el Capítulo 9.

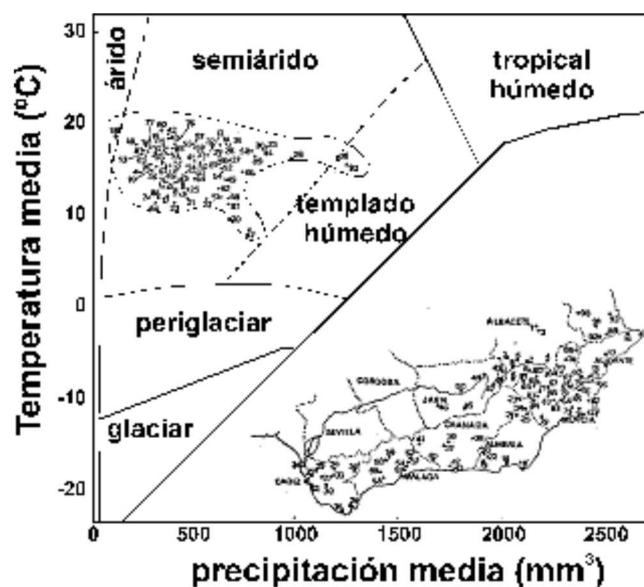


Figura 2. Temperaturas y precipitaciones medias anuales en las Cordilleras Béticas, con indicación de áreas climáticas (modificado de Pezzi, 1977).

2.1.1.1. HUMEDAD DEL AIRE

Un aspecto importante desde el punto de vista conservativo es el control de la humedad del aire. Existen distintos conceptos utilizados para controlar las relaciones entre cantidad de vapor de agua en el aire y temperatura:

- La **humedad absoluta** (HA) es la masa de vapor de agua contenida en una unidad de volumen de aire. Se expresa en gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire.
- La **razón de mezcla** es la razón entre la masa de vapor y la masa del aire seco a la que se mezcla. Se expresa en gramos de vapor por kilogramos de aire seco.
- La **humedad específica** es la razón entre la masa de vapor y la masa de aire seco más el vapor mezclado. Se expresa en las mismas cantidades que la razón de mezcla, esto es, en gramos de vapor por kilogramos de aire más vapor. Debido a que en la práctica la masa de vapor de aire es muy pequeña, los valores de la humedad específica y la razón de mezcla son casi iguales (siempre la humedad específica es un poco menor).
- La **presión de vapor** (P_{H_2O}) es la contribución a la presión atmosférica del vapor de agua contenido en el aire. Dado que el vapor de agua tiene un peso molecular menor que el del aire puro y seco, el aire húmedo es menos denso que el seco (comparando volúmenes iguales a una temperatura y presión dadas), y por lo tanto la presión atmosférica es menor en el caso de aire húmedo que seco. Se expresa en unidades de presión, normalmente en milibares (mbar; 1 atmósfera = 1.013 bares = 1013 milibares = 760 mm de mercurio = $1.013 \cdot 10^5$ Pa (Newton/m²)).
- La **presión de vapor de saturación** ($P_{H_2O,0}$, o, para simplificar, P_0) es la presión de vapor a la que el líquido (agua) y el vapor están en equilibrio, esto es, en el punto en que el aire se satura y se condensa el vapor. Esta presión es función de la temperatura. En el estado de saturación la masa de vapor de agua disuelta en un volumen dado de aire es la máxima posible. A medida que la temperatura del aire aumenta, la cantidad de vapor que puede ser disuelto aumenta, por lo que la presión de vapor de saturación también aumenta. En climas templados como el nuestro, la humedad absoluta bajo condiciones de saturación oscila entre 3-4 y 30-40 g/m³, para unas temperaturas de -5 y 35 °C respectivamente. La presión de vapor de saturación a una temperatura determinada puede ser calculada a partir de la fórmula:

$$P_0(T) = P_0(0) \cdot 10^{a \cdot T / (b+T)}$$

donde: $P_0(T)$ (mbar) es la presión de vapor de saturación a la temperatura de interés T,

$P_0(0)$ (=6.10 mbar) es la presión de vapor de saturación a 0 °C,

T (°C) es la temperatura de interés, y

a y b son constantes que valen 7.5 y 273.3 °C, respectivamente (a a temperaturas menores de 0 °C la presión de vapor debe ser calculada considerando que la fase estable es hielo, por lo que a y b valen 9.5 y 265.5 °C respectivamente).

- La **humedad relativa** (HR) es la razón, expresada en tantos por ciento, entre la masa de vapor existente en un volumen de aire (m) y la masa de vapor máxima (m_0) que contendría a la misma temperatura en el punto de saturación:

$$HR(T) = \frac{m}{m_0} \cdot 100$$

(o lo que es lo mismo, la razón, expresada en tantos por ciento, entre la humedad absoluta del aire y la humedad absoluta en el punto de saturación). Esta magnitud es función de la temperatura ya que la masa de vapor máxima que puede disolver el aire es función de la misma. Por lo tanto, al aumentar T, aumenta m_0 y disminuye HR.

- La temperatura a la que se produce la condensación del vapor de agua, esto es cuando la humedad absoluta es máxima o la humedad relativa es de 100 %, se denomina **temperatura de rocío** o **punto de rocío**.

Dado que los procesos de transformación de fase suponen desprendimiento o absorción de energía, la temperatura del aire cambia cuando se producen estos cambios. Así, la condensación supone el desprendimiento de energía. Esta energía se expresa mediante el **calor latente de condensación**, que es la energía liberada al ambiente por cada gramo de vapor que pasa al estado líquido. El valor de esta energía (por gramo de materia) es el mismo que el que se absorbe del medio en el proceso contrario de evaporación. Por lo tanto, la temperatura del medio ambiente no se mantiene constante durante el proceso de condensación, sino que aumenta. La condensación de un gramo de agua produce un aumento de 2.5 °C en la temperatura de un kilogramo de aire.

La humedad del aire se mide con distintos tipos de aparatos. El más común es el **higrómetro**, que mide la humedad relativa. A partir de ella, pueden calcularse ciertas magnitudes:

$$HR(T) = \frac{m}{m_0} \cdot 100 = \frac{HA}{HA_0} \cdot 100$$

Como HA_0 (humedad absoluta máxima a una T dada) puede conocerse (e.g., a partir de tablas), la humedad absoluta a la T de interés se obtiene mediante un simple despeje de términos:

$$HA(T) = \frac{HR(T)}{100} \cdot HA_0$$

Por otra parte, aplicando la ley de Boyle (para todos los gases a bajas presiones y temperatura constante, y lejos del punto de

licuefacción, el producto de la presión por el volumen es aproximadamente constante) al vapor de agua cerca del punto de saturación:

$$P \cdot V = P_o \cdot V_o = cte$$

$$\frac{P}{P_o} = \frac{V_o}{V} = \frac{n}{n_o} = \frac{m}{m_o}$$

siendo n y n_o las masas específicas a T constante. Entonces:

$$\frac{P}{P_o} \cdot 100 = \frac{m}{m_o} \cdot 100 = HR(T)$$

de donde la presión de vapor P a la temperatura de interés es:

$$P(T) = \frac{HR(T)}{100} \cdot P_o(T)$$

obteniéndose el valor de la presión de vapor de saturación a la temperatura de interés, $P_o(T)$, a partir de tablas.

Para hacer referencia al estado higrométrico del ambiente es mucho más útil dar el valor de la **humedad relativa** que el de la humedad absoluta o específica. De hecho, siendo la humedad relativa una expresión en tanto por ciento del grado de saturación del aire, se presta mejor a evaluar la tendencia del agua a evaporarse (o condensarse) y de los materiales a intercambiar humedad con el ambiente. Lo que interesa desde el punto de vista conservativo es evaluar las posibilidades de intercambio de vapor de agua entre el medio ambiente y el material de la obra considerada. En este sentido, es muy importante constatar las posibilidades de condensación del vapor de agua, tanto en el propio aire como sobre la superficie del material. Para ello deben conocerse las relaciones entre la temperatura del aire, la temperatura del material y el estado de humedad de ambiente, expresado tanto humedad relativa (que indica la relativa proximidad al punto de condensación o rocío) como humedad absoluta o específica (que indica la cantidad de vapor existente). Estas relaciones se ilustran en la Figura 3, donde se suponen dos casos:

- Caso A: Temperatura de la atmósfera 40°C, temperatura del material 15°C, humedades relativa y absoluta de la atmósfera 60 % y »35 g/m³, respectivamente.
- Caso B: Temperatura de la atmósfera 35°C, temperatura del material 20°C, humedades relativa y absoluta de la atmósfera 60 % y »25 g/m³, respectivamente.

En ambos casos se condensará agua sobre la superficie del material, aunque la cantidad será pequeña dado que el agua provendrá sólo de la capa de aire enfriada por contacto con el material, que suele ser de grosor muy pequeño. Así, si suponemos que el efecto térmico del material frío afecta a una película de 1 mm de aire en contacto con el mismo, se condensarían 0.021 y 0.0085 g de agua, respectivamente, por cada m² de material expuesto a la atmósfera. Estas cifras se obtienen a partir de las humedades absolutas del aire para distintas temperaturas, que permiten calcular las cantidades máximas de H₂O que pueden condensarse por descenso de temperatura de 1 m³ de aire que alcanza el punto de rocío. Para los casos A y B anteriores, estas cantidades son de 21 y 8.5 g de H₂O por metro cúbico de aire.

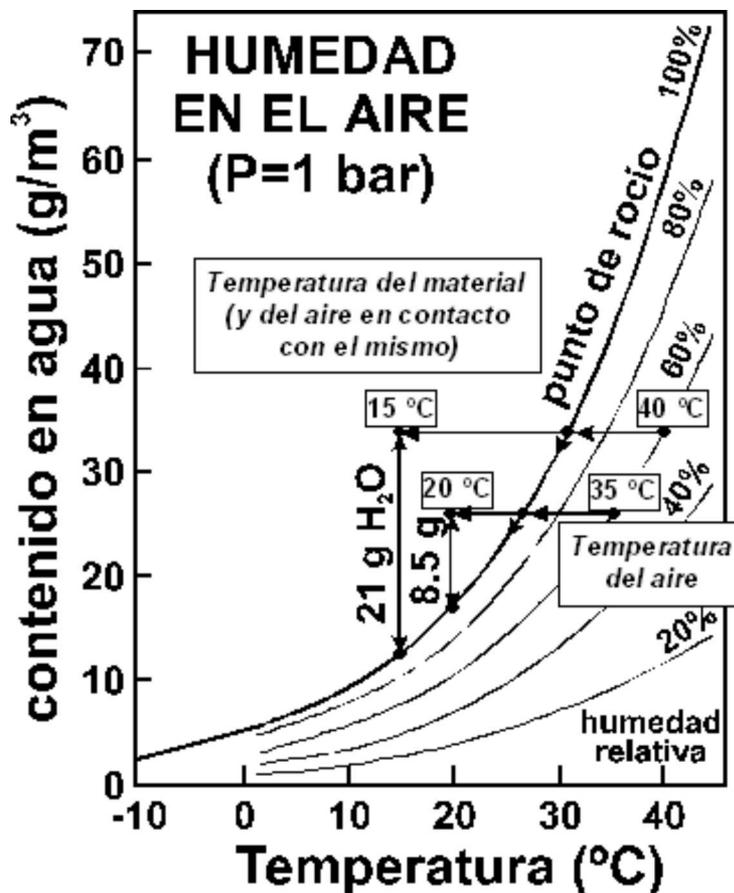


Figura 3. Relaciones entre temperatura del aire, del material, y humedad del ambiente expresada en términos de humedad absoluta (g/m^3) y humedad relativa (%).

Las cantidades de agua que finalmente se condensan sobre los materiales fríos expuestos a la atmósfera son, generalmente, mayores que las indicadas más arriba para la delgada película de aire en contacto con el material, ya que pueden establecerse corrientes de aire que pongan en contacto aire caliente nuevo y húmedo con el material frío. Además, a escala diaria se dan variaciones de temperatura del aire que pueden generar grandes volúmenes de vapor condensado, como es el caso de los días en que se forma niebla. Estas gotitas de agua líquida en suspensión en el aire se adhiere a las superficies de los materiales pétreos dadas su naturaleza hidrófila (y su menor temperatura). Este agua puede introducirse en los sistemas porosos de las rocas, y disparar una serie de procesos de alteración tanto mecánicos como químicos, lo cual puede ser peligroso particularmente en materiales no muy resistentes.

Es evidente que un control de las condiciones termohigrométricas permitiría evitar la condensación del agua sobre los materiales. Esto es en la práctica imposible para exteriores, dado que el aire circula libremente, pero puede llevarse a cabo en interiores. El control termohigrométrico es sencillo, ya que puede diseñarse con ayuda de diagramas como los de las Figuras 3 y 4.

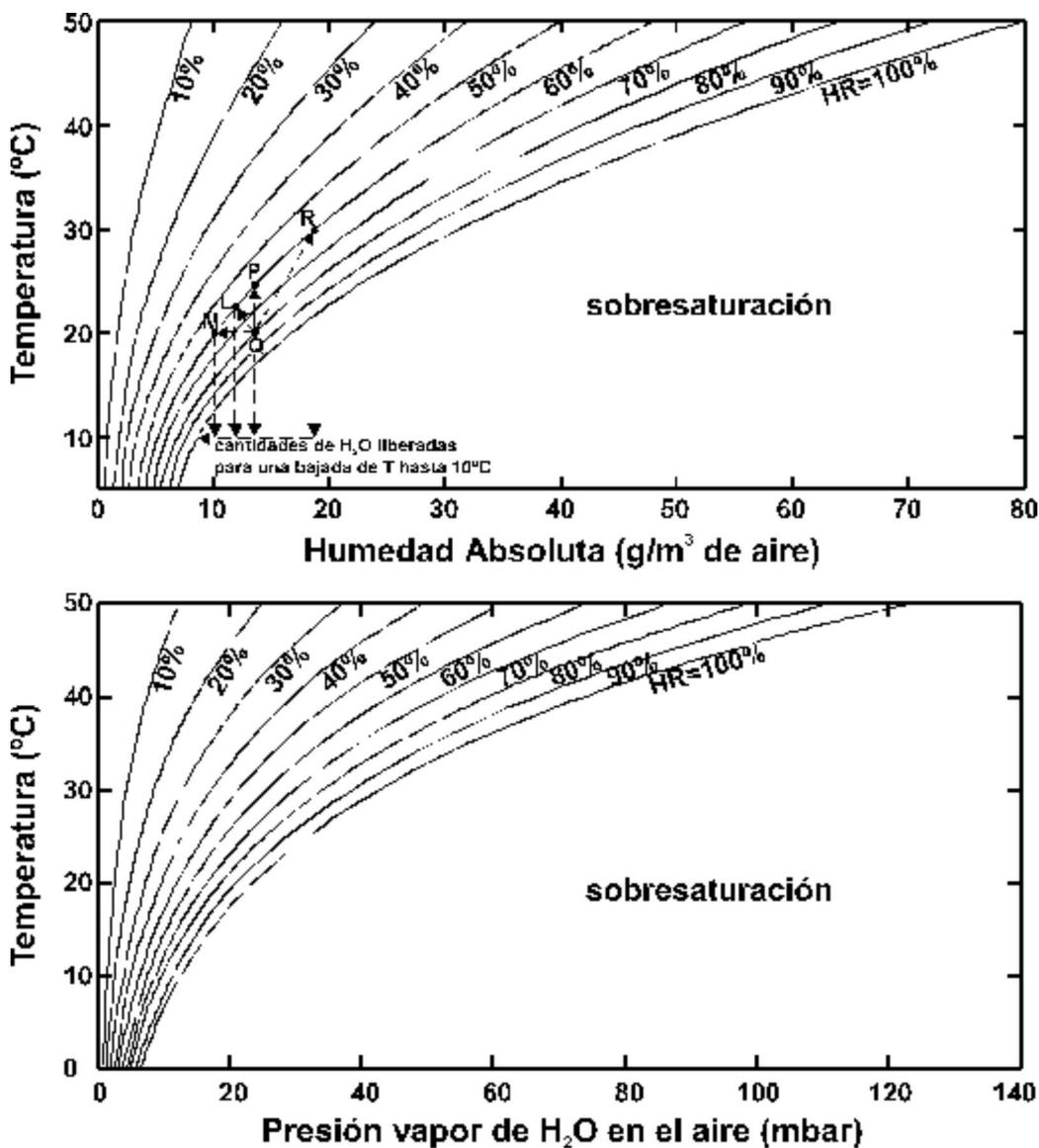


Figura 4. Diagramas temperatura-humedad absoluta del aire y temperatura-presión parcial de vapor de agua en el aire. El punto Q representa unas condiciones de 20°C y HR=80%. Los puntos M, L, P y R representan nuevas condiciones de HR= 60% por modificación de la temperatura y/o las cantidades de agua en el aire. Nótese que las cantidades de agua liberadas aumentan desde M hasta R, y que las condiciones de este último punto son inaceptables desde el punto de vista conservativo ya que se libera más agua que la correspondiente al punto L (para representa un aumento de T respecto del punto original Q).

En la Figura 4 se presentan varios casos en los que se reduce la humedad relativa desde un 80 % (humedad absoluta=13 g/m³ de aire; punto Q del diagrama higrométrico), que representa unas condiciones peligrosas dada su proximidad al punto de rocío, hasta un valor aceptable de 60 %, siendo la temperatura ambiental de 20 °C:

- 1) Pasar al punto P: ascenso de temperatura hasta cerca de 25 °C, manteniéndose constante la humedad absoluta.
- 2) Pasar al punto M: descenso de la humedad absoluta hasta cerca de 10 g/m³ de aire, manteniéndose constante la temperatura.
- 3) Pasar al punto L: modificación de ambas variables hasta temperaturas y humedades absolutas localizadas sobre la curva de HR=60% entre los puntos P y M.
- 4) Pasar al punto R: modificación de ambas variables hasta temperaturas y humedades absolutas localizadas sobre la curva de HR=60% por encima del punto P. Este último procedimiento no es aceptable ya que supone aumentar la cantidad de vapor en el ambiente y la temperatura. Así, si se produce un descenso de temperatura se libera una cantidad de agua mayor de la liberada por los puntos P, L y M (en este orden).

Otros ejemplos de cálculos termohigrométricos son:

- 1) Temperatura ambiental=14 °C; Humedad relativa=70 %; Descenso de la temperatura para alcanzar el punto de saturación=5.4 °C; Temperatura del material para condensarse el vapor de agua=8.6 °C.
- 2) Temperatura ambiental=14 °C; Humedad relativa=50 %; Descenso de temperatura durante la noche=10 °C; Aumento de la humedad relativa hasta casi 95 %. Descenso de la temperatura para alcanzar el punto de saturación: menos de 1.5°C. Temperatura del material para condensarse el vapor de agua en torno a 3 °C.

que ilustran que en cualquier estudio termohigrométrico es necesario evaluar las posibilidades de intercambio de agua entre éste y el medio ambiente. La forma y entidad de estas interacciones dependen especialmente de la porosidad y la higroscopicidad del material. A temperatura constante, en un ambiente aislado (esto es, que no intercambia masa ni energía con el resto del universo) como podría ser el interior de una

habitación de un museo, de una iglesia, de una cámara funeraria, etc., la cantidad de vapor de agua del aire disminuirá en un valor más o menos significativo en función de las características de porosidad e higroscopicidad del material. Suponiendo que se introduce en el ambiente cualquier objeto totalmente seco, produce, a temperatura constante:

- Una disminución de la humedad específica.
- Una disminución de la humedad relativa.
- Una disminución de la presión de vapor.
- Un aumento del peso del material correspondiente a la cantidad de agua adsorbida.

Una vez adsorbida cierta cantidad de agua, y si las condiciones de temperatura y humedad no cambian, el material y el ambiente tienden al estado de equilibrio, lo que implica no intercambiar más agua. Sin embargo, es fácil imaginar que esta situación hipotética no es real, ya que:

- 1) La temperatura varía diariamente y estacionalmente.
- 2) La humedad varía debido a:
 - los cambios de temperatura,
 - los fenómenos de evaporación y condensación,
 - los cambios climáticos y microclimáticos que suponen el intercambio de vapor entre el ambiente considerado y el resto de la atmósfera (el sistema no es aislado),
 - la infiltración de agua de lluvia y/o del subsuelo a través del sistema poroso de los materiales, incluyendo fisuras y defectos de la estructura,
 - la emisión al medio de vapor de agua por la respiración-transpiración de animales y plantas. Por ejemplo, un ser humano puede expulsar entre 50 y 100 g de agua en una hora. Es fácil concebir que en una sala más o menos cerrada de un museo, iglesia, palacio, etc, una multitud de visitantes pueden expulsar cantidades importantes de agua, que pasa al ambiente, y de ahí a las obras expuestas (e.g., pinturas, esculturas,...) o los materiales de construcción.

De hecho, las variaciones de las condiciones ambientales son la regla más que la excepción, particularmente al considerar el ambiente en contacto con el material pétreo expuesto a la intemperie. Estas variaciones en el medio suponen el abandono del equilibrio con el material, por lo que la natural tendencia al mismo supondrá de nuevo el intercambio de agua y su movimiento a través del material.

Desde el punto de vista conservativo, es de importancia fundamental tener presente que todos los procesos de deterioro dependen de la extrema inestabilidad del medio. Por tanto, los procesos controlados por la presencia de agua en el material (que son muchos) dependen de la cantidad de agua transferida y de la velocidad de intercambio entre el medio ambiente y el material. Debe recordarse que esto depende de las condiciones climáticas y de las características físico-químicas del material (e.g., porosidad, higroscopicidad, etc). Debido a la facilidad para manipular los materiales (e.g., aplicando sustancias hidrorrepelentes), por comparación con las dificultades técnicas que implica la intervención sobre el medio, las intervenciones de restauración se han basado clásicamente en intervenir el material. No obstante, debe tenerse en cuenta que la intervención sobre el medio es igualmente relevante, y en algunos casos, crucial, para garantizar una buena conservación de la obra.

2.1.2. Otros Factores Ambientales

Los *días de sol* influyen de manera indirecta en los procesos de alteración, a través de su efecto sobre los cambios de temperatura diarios o sobre la tasa de evaporación. En el primer caso puede suponer el sobrecalentamiento por insolación de determinadas partes del edificio, provocando cambios térmicos más bruscos y por lo tanto más nocivos. En el segundo caso, la evaporación del agua localizada en poros del material puede suponer un proceso de precipitación de sales solubles, con el consecuente deterioro por formación de costras, concreciones, eflorescencias, etc; además, si existe posibilidad de suministro de agua (por ejemplo a través de aguas de infiltración subterráneas), se puede acelerar el proceso de degradación por disolución y precipitación continuada, dando lugar a una pérdida de cohesión generalizada.

Los efectos contrarios se producirán en el caso de *días cubiertos*, que suponen condiciones más atemperadas, esto es, menores rangos de variación en la temperatura ambiental y del material y menores tasas de evaporación, al mismo tiempo que no suelen darse heladas, impidiendo la acción mecánica del hielo.

El *viento* puede ser seco, y por lo tanto aumentando la evaporación, o puede ser húmedo, trayendo consigo la lluvia. En ambos casos su efecto depende de otros factores; en el primero de ellos, depende de factores tales como la disponibilidad de agua subterránea, en cuyo caso acelerará el proceso de deterioro al igual que en el caso de la insolación; en el segundo, su efecto suele ser nocivo, ya que supone la disponibilidad de agua de lluvia o de vapor de agua en el ambiente que puede introducirse en el material y acelerar los procesos de alteración. Un efecto indirecto del viento es su acción abrasiva al llevar partículas sólidas en suspensión que chocan sobre la superficie del material, produciendo erosiones mecánicas como concavidades.

La *variabilidad de las condiciones climáticas* puede ser un factor importante. Algunos años ocasionales de altas o bajas temperaturas, o de importantes lluvias pueden producir un mayor deterioro que largos periodos con características climáticas estables. En general, aplicado a cualquier factor ambiental, las condiciones variables son más dañinas que unas condiciones estables.

Un factor importante por su efecto diferencial sobre distintas partes de un mismo monumento (o sobre distintos monumentos de una misma área) es la *orientación geográfica* de las mismas. Considerando el hemisferio norte tenemos:

- En *áreas frías y con frecuentes heladas*, las partes orientadas al sur sufrirán más ciclos de fusión y congelación del agua que las partes orientadas al norte, por lo que experimentarán mayor deterioro por gelifracción.

- En *áreas frías y húmedas y sin frecuentes heladas*, las partes orientadas al sur estarán más expuestas al sol y tendrán más microflora y microfauna, por lo que las alteraciones biológica y química serán más importantes que en las partes orientadas al norte.
- En *áreas templadas* las partes orientadas al sur pueden sufrir mayor evaporación que las orientadas al norte, por lo que el grado de alteración dependerá de la disponibilidad de agua para volver a entrar en contacto con el material. En el caso de disponerse de agua (e.g. aguas de infiltración subterráneas) las partes orientadas al sur sufrirán ciclos de precipitación y disolución de sales que supondrán una mayor importancia de la alteración química que en las partes orientadas al norte. En las partes orientadas al norte la ausencia de insolación impedirá fuertes evaporaciones, y por lo tanto el mayor desarrollo de microflora y microfauna y de alteraciones biológicas; en el caso de no disponerse de agua, lo cual sería propio de áreas más bien áridas o semiáridas, las partes orientadas al sur presentarían menor grado de humedad y mayores incrementos térmicos por insolación que las orientadas al norte, por lo que los efectos de alteraciones mecánicas debidas a tensiones térmicas serán más importantes en las primeras; en las segundas los efectos de las alteraciones químicas y biológicas serán más importantes.
- En *áreas áridas*, los procesos de deterioro más importantes son los debidos a los efectos mecánicos de los cambios bruscos de temperatura (por lo que las partes orientadas al sur sufrirán más), y a la disolución y cristalización de sales en el caso de disponibilidad de agua, en cuyo caso se aplican los mismos criterios que en el apartado anterior.

Estas consideraciones son generalizaciones que deben suponerse susceptibles de modificaciones dada la complejidad de los factores, agentes y procesos de alteración que confluyen en un caso particular. Por ejemplo, no hemos tenido en cuenta consideraciones microclimáticas locales, factores ambientales particulares como ambientes costeros, dirección predominante del viento, procedencia predominante de las lluvias, etc, etc. Además, no hemos considerado ambientes polucionados, ni hemos entrado en aspectos sobre la estática de las estructuras y la resistencia de los materiales. En cualquier caso, el análisis de todos estos factores, y los que se consideren oportunos en cada caso particular, es necesario para el establecimiento de las condiciones ambientales bajo las que se produce el fenómeno del deterioro.

2.2.AGENTES DEGRADANTES

Como agentes degradantes podemos considerar

todas aquellas sustancias, compuestos o especies químicas procedentes del medio ambiente que participan directa o indirectamente en las transformaciones que tienen lugar en el material.

Los agentes de procedencia orgánica (plantas, bacterias y animales) se discuten en un Capítulo independiente.

2.2.1.Componentes Atmosféricos Naturales

La atmósfera terrestre consiste en una mezcla de gases cuya composición es variable según la altura considerada. De las diferentes capas de la atmósfera, que se extiende al menos hasta los 10.000 km de altura, la parte que nos interesa es la más interna en contacto con la superficie sólida de la tierra, que presenta características composicionales uniformes.

El aire puro y seco está compuesto esencialmente por nitrógeno (78,084 % en volumen) y oxígeno (20,946 %). El nitrógeno como especie pura no reacciona fácilmente con las rocas, por lo que puede considerarse como inerte. Por el contrario, el oxígeno es muy activo desde el punto de vista químico, reaccionando con otros compuestos en los procesos de oxidación, tales como los que sufren las rocas al alterarse.

El 0.970 % restante del aire es en su mayor parte argón (0,934 %), que es un gas noble y por lo tanto inerte. El dióxido de carbono o anhídrido carbónico (CO₂), aunque constituye sólo el 0.033 %, es un gas de enorme importancia, tanto en lo que a los procesos de alteración se refiere, como a otros procesos atmosféricos (absorbe la radiación calorífica procedente del sol y permite el calentamiento de la parte inferior de la atmósfera), biológicos (de todos es conocido la necesidad del CO₂ en los procesos fotosintéticos de las plantas verdes) y geológicos (en gran parte, el CO₂ original de la atmósfera primigenia ha sido retirado de la misma a través de la formación de las rocas sedimentarias carbonatadas y carbonosas a lo largo de toda la historia de la tierra). Como es bien sabido, desde finales del siglo pasado se ha incrementado la proporción de CO₂, además de otros gases y partículas, en la atmósfera debido a la combustión masiva de materias primas carbonosas como maderas, carbones, gas natural y petróleo, lo cual puede hacer variar las características climáticas globales y locales (incremento de temperatura por el "efecto invernadero").

Desde el punto de vista de la alteración de materiales pétreos, el CO₂ es de especial importancia dada su participación en los procesos de disolución de carbonatos.

Los restantes gases de la atmósfera son el neón, helio, criptón, xenón (todos ellos gases nobles), hidrogeno, metano y óxido nitroso, en orden decreciente según su porcentaje en volumen, sumando menos del 0.003 %.

2.2.2.Componentes Atmosféricos Polucionantes

Todos los componentes gaseosos de la atmósfera se encuentran perfectamente disueltos, de manera que confieren unas características fisico-químicas determinadas al aire puro y seco como si fuese un único gas. Sin embargo, la atmósfera contiene cantidades variables de impurezas como vapor de agua (H₂O), SO₂, SO₃, NO₂, Cl₂, etc. El vapor de agua se incorpora a la atmósfera mediante la evaporación de aguas marinas o lacustres y por la respiración, y se devuelve por condensación en forma de nubes, agua de lluvia, nieve etc, manteniéndose el balance global de masa. Su acción como agente degradante es importante, tanto por sus características químicas particulares como por ser un disolvente excelente de un gran número de sustancias degradantes. Aunque no está considerado como compuesto polucionante, su acción se relaciona de manera importante con el resto de los agentes degradantes polucionantes, sobre todo a través de la formación de soluciones de ácidos diversos.

El resto de componentes son también importantes como agentes degradantes. Estos se depositan eventualmente sobre las superficies de las rocas bajo la forma de aerosoles, el estado disperso de la materia en un medio gaseoso, reaccionando con ellas en soluciones acuosas. Los

aerosoles comprenden tamaños de partículas desde escalas moleculares hasta pequeñas gotas, entre 0.0001 y 1 mm de radio. Los que presentan tamaños entre 0.1 y 0.001 mm parecen ser los más importantes en la alteración del material pétreo, siendo estos los iones como sulfatos, nitratos y cloruros. Algunos de estos componentes, como los sulfatos y cloruros, se incorporan a la atmósfera a partir de fuentes naturales, como los océanos, mares y lagos salinos, y otros, como los óxidos de azufre y nitrógeno, a partir de la combustión de carburantes fósiles y de un gran número de actividades industriales.

Todos estos compuestos aerosoles, además de otros muchos, sirven como núcleos de condensación del vapor de agua atmosférico; con el agua condensada, las dimensiones y las propiedades fisico-químicas cambian, siendo en general más agresivos sobre los materiales pétreos.

La concentración de estos compuestos es especialmente alta en las áreas urbanas e industriales, si bien la acción de los vientos los difunde y dispersa hacia otras zonas. En general suelen permanecer en las capas bajas de la atmósfera, aunque algunos ascienden hacia capas altas. Su concentración se ve disminuida por neutralización de los ácidos producidos con el polvo atmosférico en suspensión, retornando al suelo. La intensidad de la polución del aire se refleja por la cantidad de materia en suspensión como aerosoles o que se deposita como hollín o polvo.

No entraremos ahora en una discusión detallada sobre los efectos de la contaminación atmosférica, que es motivo de otro capítulo. Simplemente diremos que ciertos óxidos tienden a la formación de ácidos (sulfúrico, nítrico,...) altamente corrosivos para los materiales pétreos, por lo que los procesos de degradación se hacen mucho más rápidos e importantes. Además, la formación de ciertas pátinas y costras negras es, al menos en parte, un producto del depósito de material polucionante en suspensión (hollín, hidrocarburos) sobre determinadas superficies de las rocas. No es difícil imaginar el efecto nocivo de la contaminación atmosférica sobre el patrimonio artístico.

2.2.3. Polvo en Suspensión

Aunque artificialmente distinguido del resto de aerosoles (materia dispersa en un medio gaseoso) bajo el punto de vista de la alteración, el polvo atmosférico puede considerarse como la fracción sólida del aire, constituida por micropartículas dispersas. Esta distinción puede justificarse si consideramos que la composición, movimientos y efectos específicos del material sólido en suspensión constituyen un campo de investigación extremadamente vasto y complejo.

Los mecanismos de deterioro debidos al movimiento y reactividad del polvo son muchos:

- **abrasión**, debida al choque de las partículas transportadas por el viento sobre las superficies de los materiales.
- **deposición**, debida a la sedimentación directa sobre las superficies, causando, por ejemplo, las famosas costras negras, constituidas por compuestos carbonosos producidas por combustión incompleta (esencialmente hidrocarburos). Su efecto corrosivo es de larga duración debido a que una vez depositados no son removilizados por las aguas de lluvia.
- **ataque químico**, generalmente a través de agentes degradantes líquidos o gaseosos; un efecto conocido de las partículas sólidas (como algunos metales) es el de catalizadores de reacciones químicas entre el material y otros agentes agresivos.

Independientemente de su efecto agresivo, las partículas sólidas que constituyen el polvo sirven como núcleos de condensación para gotas de agua. Al entrar en contacto con las superficies pétreas, el efecto agresivo en medio acuoso se realza (además de favorecer el ataque ácido). Por otra parte, estas partículas sirven como agentes neutralizantes de los ácidos, por lo que su efecto en parte puede considerarse como beneficioso.

2.2.4. Agua de Lluvia

La composición del agua de lluvia está directamente relacionada con la composición atmosférica; su acción corrosiva se basa en los iones y compuestos en disolución adquiridos durante su transporte a través de la atmósfera. Entre estos compuestos se encuentran los de procedencia marina original (iones como Cl y Na), los de procedencia atmosférica (iones CO₃) y los de procedencia polucionante (iones SO₄, NO₃). En zonas muy contaminadas, la proporción de componentes ácidos (CO₃, SO₄, NO₃) puede ser muy elevada, proporcionado al agua un carácter fuertemente ácido (pH<7), y dando lugar a la llamada "**lluvia ácida**", altamente corrosiva.

La capacidad de limpieza de los aerosoles atmosféricos por el agua de lluvia depende esencialmente del tamaño de las gotas, del tiempo de caída y de la distancia recorrida. La absorción es mucho más elevada por las lluvias con gotas finas y lentas que por las lluvias torrenciales con gotas grandes de climas semiáridos. Las nieblas pueden por lo tanto absorber gran cantidad de aerosoles, siendo altamente tóxicas y corrosivas, como la llamada "niebla asesina" (*killling fog*) de Londres de 1958, donde se detectaron hasta 3840 microgramos de sulfatos (asimilables a ácido sulfúrico) por metro cúbico de aire (cuando la media rural de Inglaterra está en torno a 55 microgramos), muriendo en torno a 4000 personas.

El agua de lluvia, por lo tanto no ejerce una acción deteriorante directa importante, sino que se asocia a otros agentes, tales como los componentes gaseosos atmosféricos, polucionantes, polvo, microflora y microfauna, etc. Su control composicional es de vital importancia a efectos de determinar los procesos de alteración y conservativos.

2.2.5. Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas pueden percolar a través de los cimientos y muros de obras arquitectónicas mediante mecanismos diversos, aunque el más importante es la ascensión capilar. El grado de interacción con el material depende de las características composicionales y de permeabilidad y porosidad del mismo, las características climáticas del ambiente y del tipos de agua percolante.

La composición del agua de infiltración está condicionada esencialmente por el tipo(-s) de material(-es) rocoso(-s) por el que ha percolado hasta llegar a su posición actual en el subsuelo del edificio en consideración. Generalmente, las interacciones agua-roca durante su travesía subterránea producen la incorporación de las fracciones más solubles de las rocas en el agua, en forma de especies iónicas como sulfatos, carbonatos, cloruros, sodio, potasio, calcio, magnesio, etc.

El efecto principal de este tipo de aguas es la disolución de ciertos componentes solubles de los materiales pétreos (e.g. carbonatos), la

formación de fases minerales nuevas (e.g. minerales de las arcillas) y la precipitación de sales a partir de los iones en solución (e.g. halita). Estos procesos tienen como efecto modificar las características de porosidad y coherencia internas de los materiales, siendo los principales causantes, por ejemplo, de las eflorescencias y fenómenos como la arenización.

En zonas costeras, las aguas subterráneas pueden proceder total o parcialmente del agua marina, lo cual supone que el contenido en sales solubles es mucho mayor que en la mayoría de las aguas continentales. El efecto agresivo de este tipo de aguas es por lo tanto más importante, acelerándose los procesos de deterioro, tal y como puede observarse en la Catedral de Cádiz.

3.TIPOLOGIA DE LOS PROCESOS DE ALTERACION

Clásicamente se subdividen los procesos de alteración en tres categorías: de tipo físico, químico y biológico. A estas tres categorías habría que añadir las alteraciones de origen antropológico, esto es, las debidas a la actividad humana, particularmente polución y las producidas por interacción entre material pétreo alterado y los productos utilizados en restauraciones previas. En realidad esta subdivisión es artificial, dado que todos los procesos actúan simultáneamente, por lo que es difícil establecer límites y asignar causas concretas a los efectos observados.

Por otra parte, la mayoría y los mas importantes procesos de degradación están relacionados con el transporte e interacción del agua con el material pétreo, lo cual suele incluir procesos físicos y químicos simultáneamente. Así por ejemplo, supongamos el caso de una circulación de una disolución acuosa a través de un material pétreo y en contacto con un reservorio subterráneo. A medida que el agua asciende por capilaridad, reacciona con la roca, disolviendo parte de sus componentes y cambiando de concentración (proceso químico); el gradiente de concentraciones puede tender a reducirse por ascenso osmótico del agua subterránea, creándose una sobrepresión osmótica que afecta a las paredes de los poros y conductos donde se aloja (proceso físico); la dilución de la solución puede forzar la redisolución de la roca, iniciándose el proceso. Este simple ejemplo que mezcla sólo dos procesos concretos ilustra la complejidad de la descripción de los procesos de alteración, ya que en realidad el proceso descrito es único, y es al mismo tiempo físico y químico.

Sin embargo, a efectos descriptivos es necesario seguir una sistemática que, aunque imperfecta, permita el estudio de los procesos de alteración.

3.1.PROCESOS FISICOS

Los procesos físicos pueden definirse como los que producen disgregación o pérdida de cohesión de las rocas sin que se sufran cambios químicos o mineralógicos. Los procesos más importantes se deben a tensiones creadas en el interior de las rocas que producen microfracturación inter e intracristalina, esto es, la pérdida de cohesión se verifica por fracturación entre granos distintos o dentro de los granos. La microfracturación progresa con el tiempo desarrollando redes de fracturas más o menos grandes que acaban por disgregar las rocas. Los procesos más importantes son:

- Expansión térmica diferencial en minerales y entre minerales.
- Expansión por humedecimiento.
- Expansión térmica del agua en poros.
- Expansión del hielo.
- Presión de cristalización de sales.
- Presión de hidratación de sales, arcillas y óxidos.
- Expansión térmica diferencial de sales.
- Presión de adsorción de agua "ordenada".
- Presión osmótica de soluciones en poros.
- Fracturación por carga en estructuras defectuosas.
- Efecto de terremotos y otras vibraciones.

Otros procesos físicos que producen disgregación y pérdida de materia de las rocas son:

- Abrasión eólica.
- Erosión del agua de lluvia.
- Impactos.

3.2.PROCESOS QUIMICOS

Los procesos químicos pueden definirse como aquellos que suponen cambios químicos globales y/o mineralógicos de la roca original, lo cual conlleva al mismo tiempo cambios en sus características físicas (porosidad, permeabilidad, resistencia a la tensión, cambios de volumen, pérdida de cohesión, etc.). Los procesos químicos más importantes son:

- Disolución.
- Oxidación-reducción.
- Carbonatación.

- Hidrólisis.
- Precipitación de sales.

En los procesos químicos tiene una importancia fundamental la composición original de las rocas. Para abordar estos procesos nos centraremos en los desarrollados sobre rocas silicatadas y carbonatos, dado que son las más utilizadas como materiales de construcción. Las rocas detríticas y morteros, al ser materiales compuestos de varios tipos de sustancias generalmente silicatadas y carbonatadas, se pueden considerar incluidos en los anteriores.

3.3.PROCESOS BIOLÓGICOS

Los procesos biológicos pueden definirse como los producidos por organismos vivos, especialmente líquenes, hongos y bacterias. Estos procesos son tanto de tipo físico (plantas y animales superiores) como químico (microorganismos). Estos últimos pueden considerarse como especialmente dañinos, sobre todo porque realzan el efecto de los procesos químicos "inorgánicos". Por otra parte, hay que señalar que a pesar del efecto nocivo de la colonización de algunos microorganismos sobre los materiales de construcción, la formación de estas colonias puede, a veces, ser beneficiosa, ya que impiden un fácil acceso de los agentes degradantes al interior del material. Dado que estos procesos dependen del tipo de organismo involucrado, los consideraremos en función de los mismos, esto es, debidos a la acción de:

- Bacterias.
- Líquenes.
- Musgo.
- Hongos.
- Algas.
- Plantas.
- Animales excavadores.
- Excrementos de aves.

[1]

En este sentido es interesante señalar la frecuente alteración de elementos ornamentales en los baños térmales (e.g., las columnas y capiteles de caliza y mármol de los baños de la Carrera del Darro, en Granada, han sufrido una intensa disolución fácilmente apreciable).