

DISOLUCION DE ROCAS CARBONATADAS. CUANTIFICACION DEL PROCESO ACTUAL DE KARSTIFICACION EN EL MACIZO DE LA PIEDRA DE SAN MARTIN (PIRINEO OCCIDENTAL)

Jerónimo López Martínez*

RESUMEN

A lo largo de un año y en las cuatro estaciones climatológicas se han efectuado muestreos de la precipitación, los manantiales y ciertos puntos del interior del macizo de la Piedra de San Martín, uno de los más importantes conjuntos kársticos de los Pirineos y destacado también a escala mundial.

Los resultados de los análisis químicos efectuados, unidos a los datos hidrológicos y climáticos conocidos, nos han permitido establecer una cuantificación aproximada de la tasa actual de disolución de la roca caliza de edad Santiense que constituye el macizo, siendo dicha tasa el equivalente a 125 mm. de espesor de roca caliza cada 1.000 años.

Los datos observados en el macizo de la Piedra de San Martín concuerdan con lo apuntado por otros autores referente a que entre los factores —precipitación, temperatura y presión parcial de CO_2 — que más influyen en la reacción principal que produce la karstificación ($\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CO}_3\text{Ca}$), el más importante es la cantidad de precipitación. Asimismo, el valor obtenido en nuestro caso para la tasa de denudación apoya la existencia de una relación lineal entre denudación en un macizo kárstico y precipitación, acoplándose de forma notable a la gráfica correspondiente a dicha relación establecida para distintos lugares de la Tierra sometidos a diversos climas.

* Departamento de Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid.

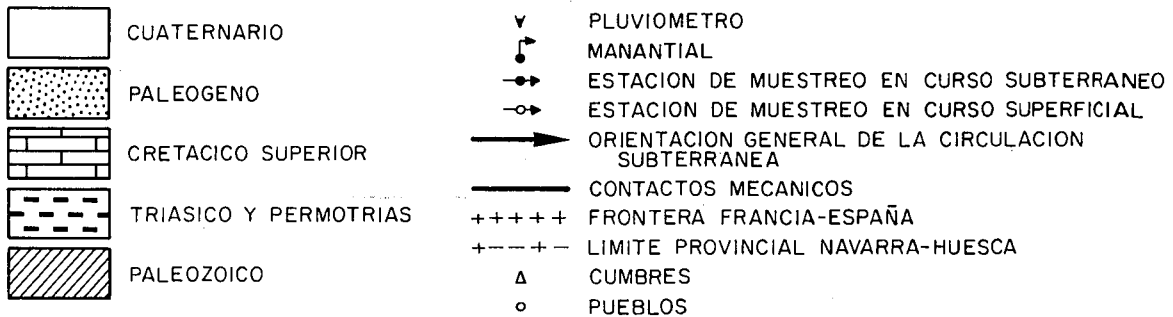
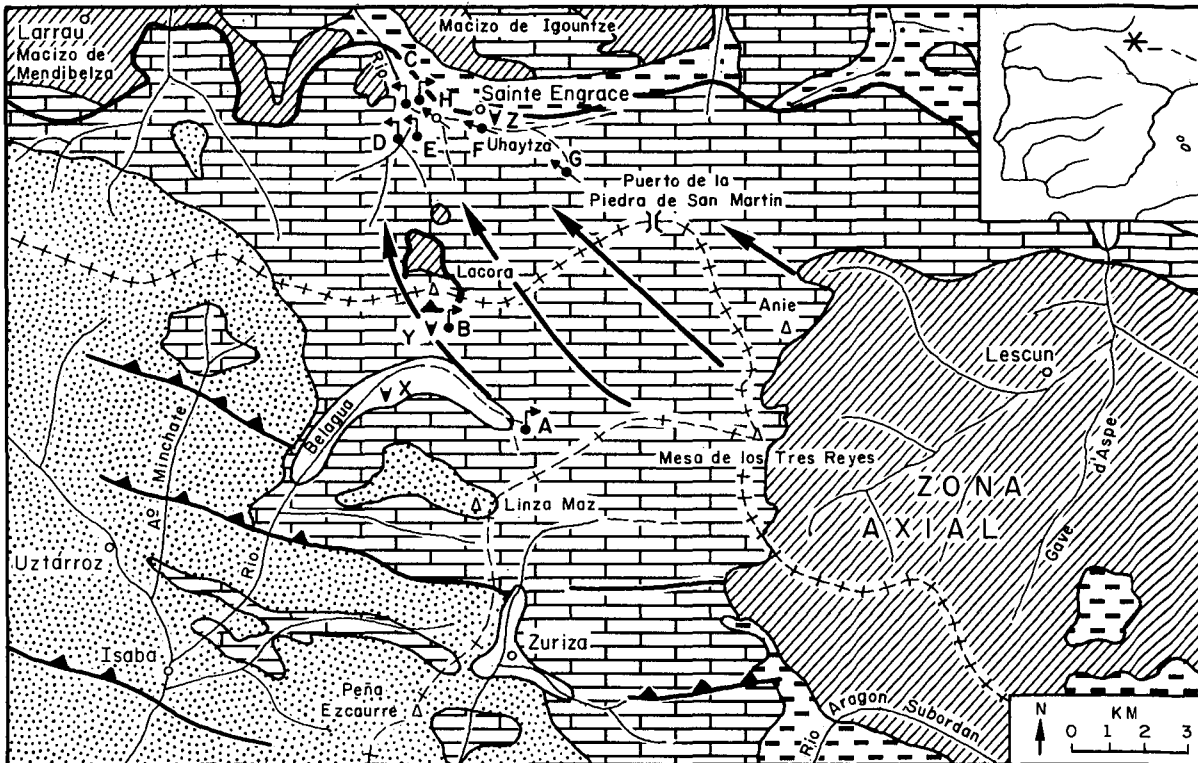


Figura 1. Entorno geológico y localización de las estaciones de muestreo.

PROCESOS KARSTICOS EN EL PIRINEO OCCIDENTAL

SUMMARY

Precipitation, springs and several internal points of the Piedra de San Martín Massif have been sampled along one year during the four climatic seasons. This is one of the most important karstic complexes of the Pyrenees and also of the world.

The approximate quantification of the solution rate of the Santonian limestones has been established on basis of the results of the chemical analysis and climatic and hydrologic data. It amounts to 125 mm. per thousand years.

Data observed in the Piedra de San Martín are in good agreement with the known data precipitation is the most important factor among those controlling the main reaction in the karstification proces ($H_2O-CO_2-CO_3Ca$): precipitation, temperature and partial pressure of CO_2 .

Our data confirm a lineal relation between denudation in a karstic massif and precipitation. There is a good correlation with graphics showing this relationship for several Earth places with different climates.

Para el conocimiento del karst resulta de interés la descripción, catalogación y cartografía de los elementos morfológicos peculiares que se dan tanto en superficie como en profundidad; pero, además, se hace necesario tener en cuenta los procesos químicos que ocasionan la disolución y precipitación de las rocas.

Un método para abordar el estudio de los citados procesos es controlar las entradas y salidas de agua al sistema kárstico, lo cual nos permitirá establecer cuantificaciones sobre los efectos provocados a lo largo de su circulación por el macizo.

La recopilación de datos cuantitativos referentes a estos procesos en distintas áreas ayudará a establecer principios cada vez más generalizables al conjunto de las regiones karstificadas, colaborando en el establecimiento de las pautas por las que se rigen los procesos morfogenéticos kársticos.

En este sentido, y dentro de un estudio geomorfológico e hidrogeoquímico más amplio del macizo de la Piedra de San Martín, se ha efectuado una serie de muestreos y análisis químicos e isotópicos, parte de los cuales ya han sido publicados (LOPEZ, J.; HERRAEZ, I. y LLAMAS, M.R., 1984), que nos permiten efectuar algunas consideraciones sobre el proceso actual de disolución kárstica en este notable macizo pirenaico.

El Macizo de la Piedra de San Martín

La zona estudiada se extiende entre las cabeceras de los valles de Roncal, Ansó y Sainte Engrace, comprendiendo territorios de Navarra, Huesca y el departamento francés de Pyrénées Atlantiques (Fig. 1).

Los afloramientos están constituidos fundamentalmente por rocas carbonatadas del Senoniense (Cretácico Superior) que forman parte de la cobertera mesozoica que recubre a la zona Axial Pirenaica. Estos materiales se ven afectados, al norte, por la importante fractura de dirección Este-Oeste que recorre el valle de Sainte Engrace y forma parte del denominado accidente frontal norpirenaico, mientras que al sur y al este quedan recubiertos por rocas del Paleogeno.

La serie cretácica se encuentra en general buzando hacia el norte entre 10° y 30° y basculada por fallas, lo que le permite abarcar un amplio margen altitudinal entre los 2.507 m. del Pic d'Anie —máxima cota de la región— y el valle francés de Sainte Engrace situado a menos de 500 metros. Este motivo, unido a la existencia de la formación santoniense denominada “caliza de los cañones” que presenta un espesor de 250 a 300 metros, y a las características climáticas de la zona, han favorecido la formación de uno de los sistemas kársticos más desarrollados y espectaculares que se conocen.

Se trata de un karst de carácter pluvionival que recoge las importantes precipitaciones que recibe el macizo. A pesar de la discontinuidad de los registros meteorológicos, puede estimarse que la precipitación anual excede los 2.000 mm. en toda la zona y llega a superar los 3.000 mm. en ciertos lugares (ver detalles en LOPEZ, J., 1982).

Las características estratigráficas y estructurales del macizo provocan que la circulación subterránea se dirija hacia el territorio francés, encontrándose en el valle de Sainte Engrace las principales surgencias (Illamina con 5.640 l/s. y Bentia con 2.370 l/s) así como un probable embalse subterráneo del cual las citadas surgencias funcionan como aliviaderos.

Debido al régimen de alimentación hídrica del sistema kárstico, éste presenta dos estiajes, en verano e invierno y dos máximos, en primavera y otoño, siendo especialmente notable la crecida primaveral, coincidente con la fusión de las nieves (Fig. 2).

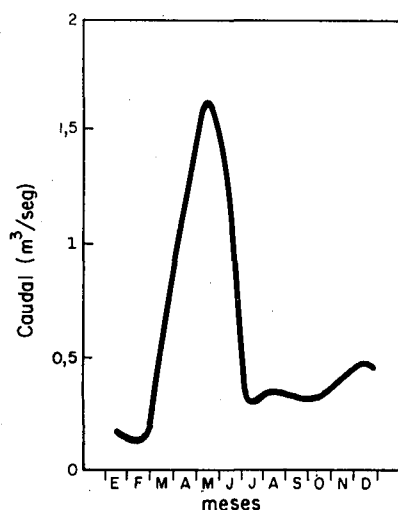


Figura 2. Distribución media mensual de caudales del río subterráneo San Vicente en la Sala de la Verna.

Mediciones efectuadas de 1961 a 1965 mediante el limnigrafo instalado por E.D.F. Este periodo incluye un año (1963) excepcionalmente húmedo en el que el estiaje de verano apenas se notó.

PROCESOS KARSTICOS EN EL PIRINEO OCCIDENTAL

Datos recogidos y resultados de los muestreos

Mediante tres pluviómetros, situados en el Llano de Belagua (X) (950 m.), Refugio de Belagua (Y) (1.428 m.) y Sainte Engrace (Z) (630 m.) (Fig. 1), se ha recogido la precipitación a diversas altitudes y en ambas vertientes del macizo.

Por otra parte, se seleccionaron una serie de manantiales, cursos superficiales y lugares del interior del sistema kárstico para efectuar en ellos los muestreos. La localización y características principales de estas estaciones se encuentran reseñadas en la Fig. 1 y en el Cuadro 1.

CUADRO 1
Identificación y datos relativos a los lugares muestreados

Denominación	Nombre	Localización	Cota (m.)	Caudal medio anual (l/s.)
A	Fuente del Rincón de Belagua (manantiai)	Ladera Oeste de la Paquiza	1.200	1,2
B	Fuente de Sancho Garde (manantial)	Ladera S.E. de Lakora.	1.489	5
C	Presa del río Uhaytza (embalse superficial, principalmente alimentado por surgencias kársticas)	Valle de Sainte Engrace	445	10.000
D	Gruta de Kakouetta (manantial)	Garganta de Kakouetta	550	5
E	Cascada de Kakouetta (manantial)	Gargante de Kakouetta	540	320
F	Trou de Renard (embalse subterráneo)	Proximidades de Sainte Engrace	460	—
G	Sala de la Verna (río subterráneo)	Garganta de Arphidia	1.075	1.060
H	Cauce del río Uhaytza (río superficial)	Bentia	445	—

La estación C (Presa del río Uhaytza) se encuentra alimentada fundamentalmente por las dos surgencias principales del macizo, Illamina y Bentia, antes mencionadas.

En la sala de la Verna (G) se tiene acceso, mediante el tunel excavado por EDF, a una de las líneas de flujo importantes del macizo, el río subterráneo denominado San Vicente, que recolecta las aguas del conjunto de cavidades conectadas con la Sima de la Piedra de San Martín, y cuyo régimen de caudales se muestra en la Fig. 2.

El Trou de Renard (F), permite acceder, a unos 125 m. bajo la superficie, al nivel saturado existente bajo el valle de Sainte Engrace (ver Figs. 2 y 3 en LOPEZ, J. et al., 1984).

En todos los lugares indicados se han efectuado muestreos abarcando las cuatro estaciones del año. Se realizaron varias determinaciones sobre el terreno, completándose con los análisis químicos en el laboratorio.

Los cálculos del índice de saturación de la calcita (IS_c) y de la presión parcial de CO_2 (P_{CO_2}) se han realizado mediante el programa WATEQF (PLUMMER et al., 1976).

Analizadas las precipitaciones, queda puesta de manifiesto la escasa mineralización de las aguas, con bajos contenidos iónicos (8 mg/l. de CO_3H y 1,3 mg/l. de Ca^{++}), pH ácido (5,6), relativamente poca conductividad (50 mhos/cm.), y subsaturación respecto a la calcita (IS_c entre -4 y -5).

Por su parte, las aguas muestreadas en el interior del sistema kárstico y en las surgencias son fundamentalmente bicarbonatadas cálcicas (87 a 161 mg/l. de CO_3H^- y 27 a 54 mg/l. de Ca^{++}), pH alrededor de 8, conductividad entre 150 y 300 mhos/cm. y se encuentran en equilibrio con la calcita (IS_c entre -0,2 y +0,5).

Los resultados de los análisis químicos, han sido expuestos de forma más detallada y completa en un trabajo anterior (LOPEZ, J. et al., 1984), siendo mostrados aquí, únicamente y de forma simplificada, los diagramas de Stiff representativos de las precipitaciones y de los manantiales en su conjunto (Fig. 3), con los que queda puesta de manifiesto la naturaleza de las aguas del macizo y el proceso de disolución por el agua sobre la caliza.

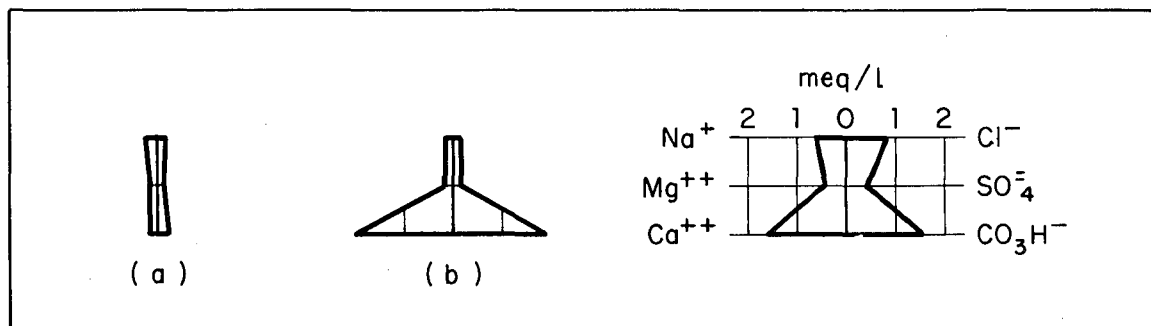


Figura 3. Diagramas de Stiff representativos de las precipitaciones (a) y de las surgencias (b).

PROCESOS KARSTICOS EN EL PIRINEO OCCIDENTAL

Las variaciones del contenido HCO_3^- a lo largo del año en los distintos puntos muestreados se ha representado en la Fig. 4, en la que puede apreciarse que a pesar de las considerables variaciones de caudal entre los distintos muestreos en una misma estación (Fig. 2), las concentraciones de bicarbonatos no experimentan, salvo excepciones, cambios especialmente destacables.

Las temperaturas de las aguas no muestran, en general, variaciones estacionales importantes dentro de un mismo lugar de muestreo, como puede apreciarse en la Fig. 5, en la que se relaciona también el contenido de HCO_3^- con la temperatura.

Otro de los factores que intervienen en la disolución de la caliza por el agua, la presión de CO_2 , ha sido representada en la Fig. 6, en la que se ha señalado el campo de variación a lo largo de los diferentes muestreos efectuados.

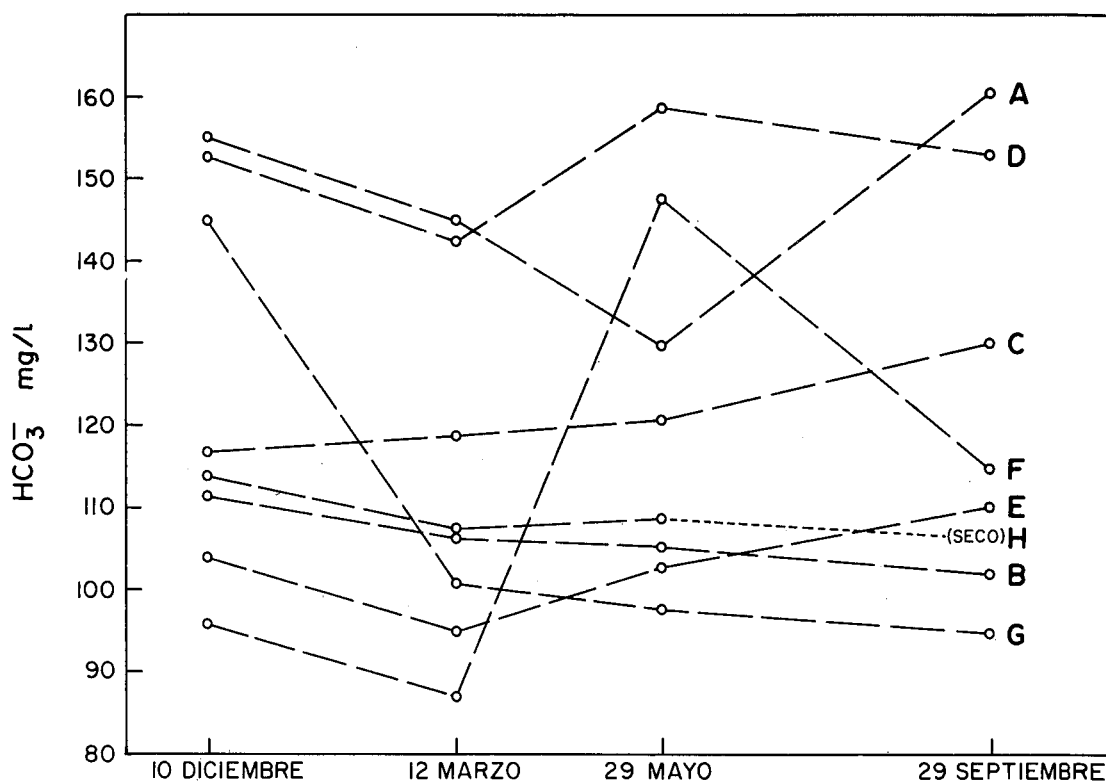


Figura 4. Variación del contenido en HCO_3^- a lo largo del año en los distintos puntos muestreados (A,B,C,...según cuadro 1).

JERONIMO LOPEZ MARTINEZ

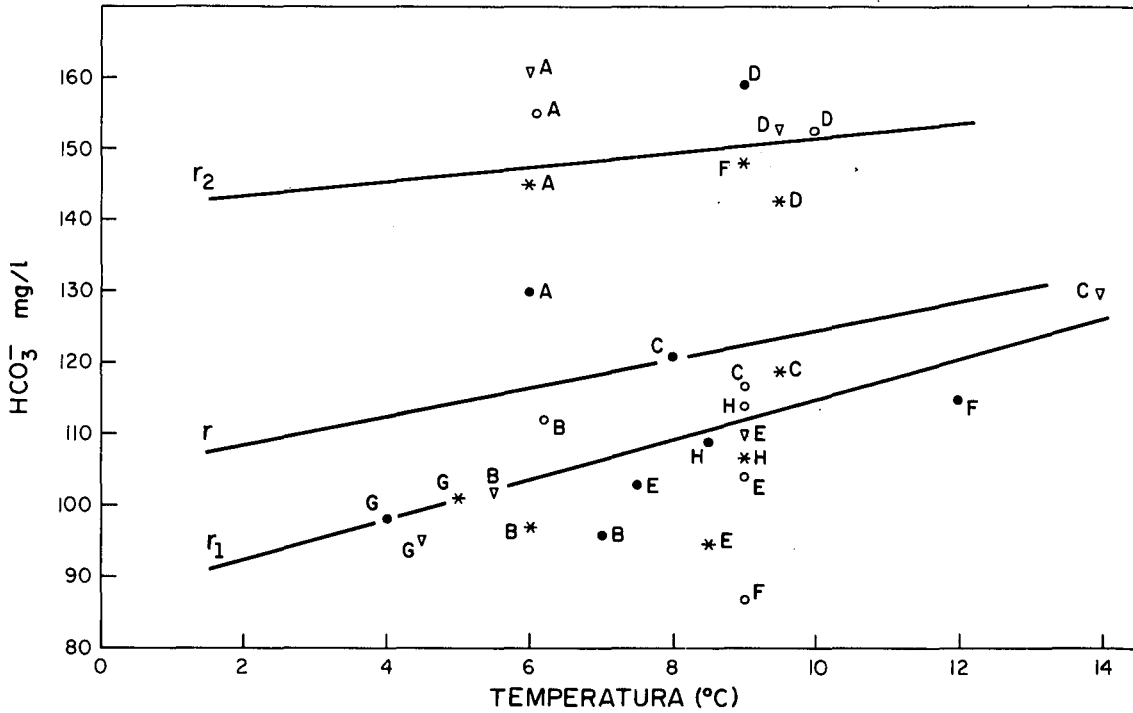


Figura 5. Relación entre alcalinidad y temperatura en las aguas del macizo kárstico de la piedra de San Martín.

(A, B, C, puntos muestreados según Cuadro 1)

Muestras: \circ Otoño, $*$ Invierno, \bullet Primavera, ∇ Verano

Rectas de regresión: r_1 de las estaciones B, C, E, F, G, H

r_2 de las estaciones A, D

r de todas las estaciones

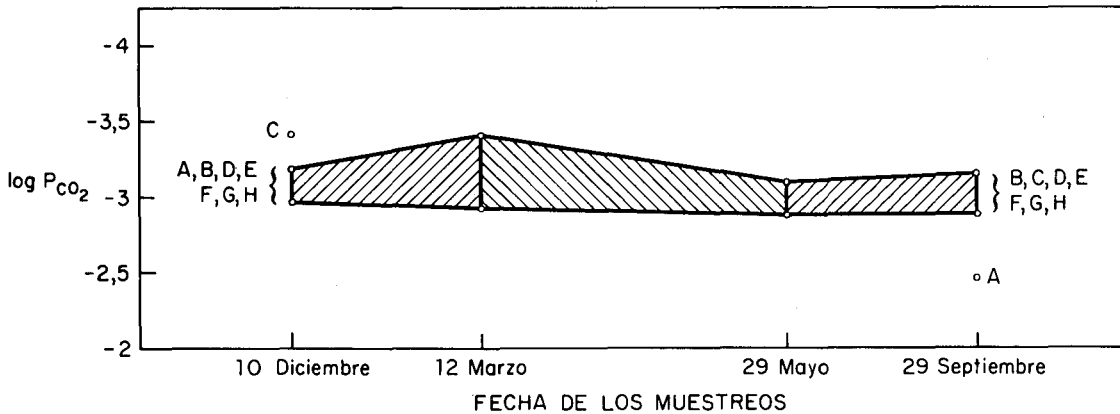


Figura 6. Evolución de la P_{CO_2} en los muestreos efectuados.

(A, B, C, estaciones de muestreo según cuadro 1)

Consideraciones sobre el proceso de disolución de la roca caliza y la denudación del macizo

La reacción principal de disolución de la caliza ($\text{CO}_3\text{Ca} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
 $\text{Ca}^{++} + 2 \text{CO}_3\text{H}^-$) requiere una fuente de acidez, que puede ser la atmósfera exterior (P_{CO_2} aprox. 0,035%) o interior de las cavidades (más o menos conectada con la exterior según los casos), o bien los suelos, donde los valores pueden ser hasta cien veces superiores a la cifra citada.

Al poseer el macizo de la Piedra de San Martín cotas de elevación considerable, presenta extensas áreas por encima del límite altitudinal del bosque en las que los lapiaces desnudos quedan expuestos directamente a la atmósfera. Existen suelos y recubrimientos vegetales a menor altitud e incluso arriba en ciertos lugares, en particular ocupando el fondo de algunas depresiones kársticas. Naturalmente en estos puntos las aguas tenderán a adquirir una mayor acidificación, a pesar de lo cual, su agresión sobre la roca caliza situada en la base de los citados suelos puede ser considerablemente menor que lo que cabría esperar, pues dependiendo del contenido en carbonatos del suelo, el agua que alcance el lecho rocoso habrá disuelto ya una cantidad variable de materiales del propio suelo (TRUDGILL, S.T., 1976).

Los valores de la P_{CO_2} registrados en el macizo son relativamente bajos, tanto en las aguas muestreadas por nosotros (Fig. 6) como en las mediciones efectuadas en la atmósfera de la BU 56, una de las cavidades importantes del macizo, en la que desde la superficie hasta los 1.100 m. de profundidad se han apreciado variaciones entre 0,01% y 0,05% (MAIRE, R., 1982). De todas formas, el aumento de la P_{CO_2} observado en el sentido del flujo, junto a la mezcla de aguas con diferente contenido en anhídrido carbónico, se traducirían en un incremento de la capacidad de disolución del agua en su circulación a lo largo de la zona vadosa, para reducirse dicha agresividad al llegar a la zona freática donde, como indica PALMER, A.N. (1984), las fuentes de CO_2 son raras y de poca importancia.

Aunque la presión parcial de CO_2 del aire en contacto con el agua es, para un volumen dado de agua un factor fundamental en la disolución de la caliza, la incidencia de este factor en la tasa de denudación es relativamente reducida pues, como ha calculado teóricamente WHITE, W.B. (1984), dicha tasa varía con la raíz cúbica de la P_{CO_2} .

La temperatura es también un factor a considerar en el proceso de disolución de la caliza, influyendo en el sentido de aumentar la solubilidad del CO_2 en climas fríos. Sin embargo, este factor es el de menor incidencia de los tres (precipitación, P_{CO_2} y temperatura) a la hora de determinar la tasa de denudación de la caliza (WHITE, W.B., 1984).

Para cuantificar la denudación en la zona, hemos extrapolado al conjunto del macizo los datos relativos al balance hídrico efectuado para el territorio navarro (DFN, 1977).

JERONIMO LOPEZ MARTINEZ

Se ha considerado la extensión de la zona aproximadamente 120 km², la precipitación anual alrededor de 2.500 mm. y la evapotranspiración real, obtenida por diferencia en el citado balance, un 20%, es decir 500 mm. De este modo, el acuífero kárstico recibe una recarga anual de 238 Hm³ y teniendo en cuenta los 150 mg/l. del contenido medio en bicarbonatos observado en las aguas que han atravesado el macizo y los 2,5 gr/cm³ de densidad del material, el volumen de caliza disuelto anualmente será del orden de 1,5 x 10⁴ m³/año, lo cual supone 0,125 mm/año.

Es decir, la tasa de denudación estimada para el macizo, en función de las observaciones actuales es 125 mm. cada 1.000 años.

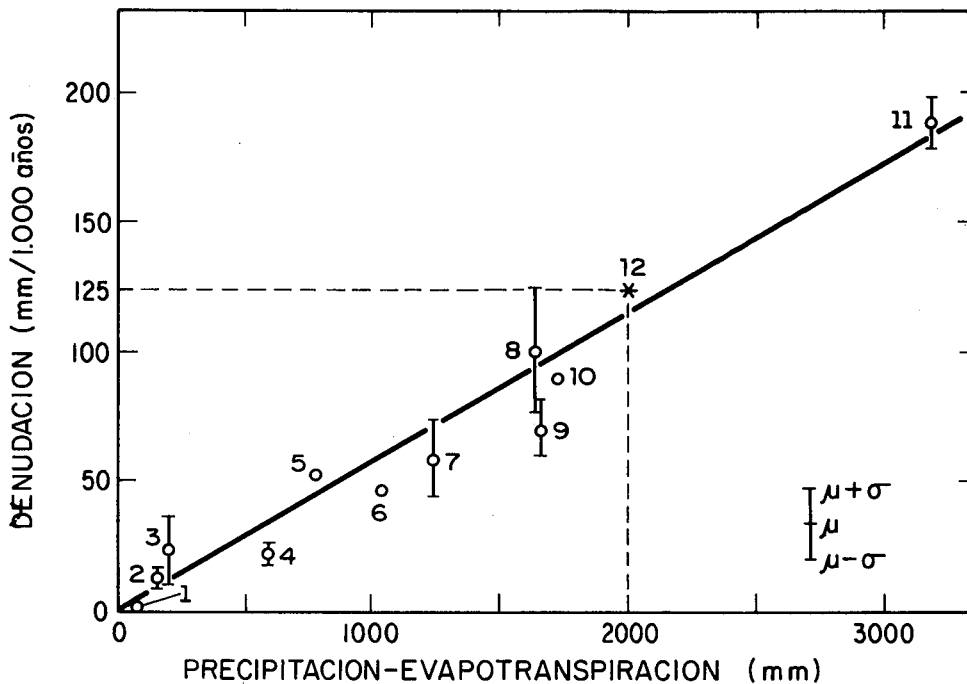


Figura 7. Tasas de denudación en función de la precipitación en diferentes zonas según diversos autores (Tomado de White, W.B. 1984).

Los puntos representados corresponden a los siguientes lugares:

- | | | | |
|-------|-------------------|-------|------------------------------|
| 1 | Artico canadiense | 7 | Montanas del Tatra (Polonia) |
| 2 y 3 | Polonia | 8 y 9 | Nueva Zelanda |
| 4 | West Virginia | 10 | Belize |
| 5 | Irlanda | 11 | Malaysia |
| 6 | Bulgaria | | |

Sobre la recta obtenida con los casos anteriores se ha superpuesto el punto correspondiente al Macizo de la Piedra de San Martin (punto 12 *)

PROCESOS KARSTICOS EN EL PIRINEO OCCIDENTAL

Diversos autores afirman que la precipitación es el factor más importante para el desarrollo de la karstificación y WHITE, W. B. (1984) indica que hay razones teóricas para la existencia de una relación lineal entre denudación en un macizo karstico y precipitación. Este hecho queda puesto de manifiesto con la correlación que se aprecia al representar las tasas de denudación citadas por diferentes autores para varios macizos karsticos situados en lugares de diferente climatología (Fig. 7). A esta gráfica hemos superpuesto el valor obtenido por nosotros para el macizo de la Piedra de San Martín, apreciándose una notable concordancia.

En nuestro caso, el período del año en que la disolución es más importante es la primavera, cuando los caudales son mucho mayores a causa de la fusión de la nieve (Fig. 2). En esa época, se produce una dilución, las aguas quedan subsaturadas en calcita y con capacidad de disolver (LOPEZ, J. et. al., 1984).

Con una serie de muestreos efectuados de forma espaciada y a lo largo de un sólo año hemos procurado llegar a una cuantificación aproximada del proceso actual de karstificación en el Macizo de la Piedra de San Martín. Sin duda, un registro continuo y más prolongado aportaría unos datos más fiables y permitiría conclusiones mejor fundamentadas.

Cuanto más precisos y abundantes sean los datos recogidos, más posibilidades existirán para conectar los resultados químicos con la génesis de formas particulares en el karst.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Servicio Geológico de la Diputación Foral de Navarra y al Laboratorio Químico de Navarra, las facilidades dadas para la realización de los análisis químicos.

BIBLIOGRAFIA

- D.F.N. DIPUTACION FORAL DE NAVARRA (1977). *Proyecto Hidrogeológico de Navarra*. Pamplona.
- LOPEZ MARTINEZ, J. (1982). Geología, Geomorfología, Clima e Hidrología del Macizo de la Piedra de San Martín. *Reunión Monográfica sobre el karst. Larra*. Publ. del Serv. Geol. de la Direcc. de Obras Públicas de la D.F.N., pp. 13-53.
- LOPEZ MARTINEZ, J.; HERRAEZ SANCHEZ DE LAS MATAS, I. y LLAMAS, M.R. (1984). Contribución al conocimiento hidrogeoquímico del Macizo Kárstico de la Piedra de San Martín. *I. Congreso Español de Geología*. Tomo IV, pp. 175-188.
- MAIRE, R. (1982). Connaissances actuelles sur le Karst profond de Larra. *Reunión Monográfica sobre el Karst. Larra*. Publ. Serv. Geol. de la Direcc. de Obras Públicas de la D.F.N. pp. 55-79.
- PALMER, A.N. (1984). Geomorphic Interpretation of Karst Features. In *Groundwater as a Geomorphic Agent*. Edited by La Fleur, R.G. Allen and Unwin Ltd. pp. 173-209.
- PLUMMER, L.; JONEZ, B. and TRUESDELL, A. (1976). WATEQF: A Fortran IV Version of WATEQ, a Computer Program for Calculating Chemical Equilibrium of Natural Waters. U.S.G. S. Water Resources Division. 12101. Sunrise Valley Drive. Reston, Va. 22092.
- TRUDGILL, S.T. (1976). Limestone Erosion Under Soil. *Proc 6th Int. Speleol. Congr. Prague*. Czechoslovakia Academia Press. pp. 409-422.
- WHITE, W.B. (1984). Rate Processes: Chemical Kinetics and Karst Landform Development. In *Groundwater as a Geomorphic Agent*. Edited by LaFleur, R.G. Allen und Unwin Ltd. pp. 227-248.