



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

BIBLIOTECA

22 OCT 1997

**boletín**

**geológico**

**y minero**

VOLUMEN 108

Mayo - Junio 1997

NUMERO 3



REVISTA BIMESTRAL DEL ITGE FUNDADA EN 1874

ISSN 0366 - 0176

Volumen 108

Número 3

Mayo-Junio 1997

# boletín geológico y minero

22 OCT 1997

revista bimestral de geología, minería y ciencias conexas fundada en 1874 - 5.ª seri



## Sumario

<b>Geología</b>	E. GONZALEZ GARCIA, A. RUIZ PEREA, L. GAVETE CORVINOS y A. GARCIA CORTES: Simulación numérica en Geología Marina mediante el código Geoline ... ..	3
	I. RABANO y A. ARRIBAS: Los ejemplares tipo y figurados de las colecciones paleontológicas del Museo Geominero. I. Invertebrados e icnofósiles paleozoicos ... ..	13
	A. APARICIO, C. RISSO, J. G. VIRAMONTE, M. MENEGATTI e I. PETRINOVIC: El volcanismo de Isla Decepción (Península Antártica) ... ..	19
<b>Aguas Subterráneas</b>	J. L. GARCIA-AROSTEGUI, M. C. BUESO, J. CRUZ-SANJULIAN, J. M. ANGULO, F. J. ALONSO y J. BENAVENTE: Modelización estocástica del acuífero del Río Vélez (Málaga): Aplicación al diseño de redes de control del nivel piezométrico ... ..	43
<b>Geoestadística</b>	M. BALBAS, M. J. BALBAS, R. BENITO, E. CHACON, J. M. ESTEBARANZ, J. C. LOSADA y F. J. OCARIZ: Interpretación de diagráfias mediante redes neuronales ... ..	55
	M. BALBAS, M. J. BALBAS, E. CHACON y F. J. OCARIZ: Simulación de heterogeneidades de fracturación mediante procesos de gibbs ... ..	63
<b>Estudio de Minerales y Rocas</b>	J. S. COZAR, A. IBARRA y A. PEREZ: Síntesis de berilo dopado con Cromo, a partir de berilo natural de origen español ... ..	69
<b>Información</b>	O. PUCHE y M. AYARZAGÜENA: Ingenieros de minas arqueólogos en el siglo XIX. La huella de Prado. Homenaje a Casiano de Prado (1797-1866) en el bicentenario de su nacimiento ... ..	79
	R. CASTROVIEJO: Minería para el desarrollo ... ..	101
	Notas bibliográficas ... ..	107

DIRECCION Y ADMINISTRACION  
Ríos Rosas, n.º 23 - 28003-Madrid  
Fax (91) 349 57 62



Ministerio de Medio Ambiente

El Instituto Tecnológico Geominero de España hace presente que las opiniones y hechos consignados en sus publicaciones son de la exclusiva responsabilidad de los autores de los trabajos.

Los derechos de propiedad de los trabajos publicados en esta obra fueron cedidos por los autores al Instituto Tecnológico Geominero de España.  
Queda hecho el depósito que marca la Ley.

EXPLICACION DE PORTADA  
Vista del pico del Teide desde la zona de los Roques de García  
(Isla de Tenerife)

Foto: Félix Bellido (ITGE)

Depósito legal: M. 3.279 - 1958  
ISSN 0366-0176  
NIPO 241-97-001-8

Gráficas Chile, S.A.L. - Chile, 27 - Teléf./Fax 359 57 55 - 28016 -MADRID

## SIMULACION NUMERICA EN GEOLOGIA MARINA MEDIANTE EL CODIGO GEOLINE.

Por E. GONZALEZ GARCIA (\*), A. RUIZ PEREA (\*\*), L. GAVETE CORVINOS (\*\*)  
y A. GARCIA CORTES (\*\*\*)

### R E S U M E N

En el presente artículo se pretende en un principio, aprovechando la cada vez mayor potencia de cálculo de los ordenadores, aplicar las matemáticas al estudio geológico de cuencas oceánicas y márgenes continentales, y en general a cualquier área cubierta por una lámina de agua en la que se haga una investigación de esta índole, buscando además la creación de un modelo que ayude a profundizar en su conocimiento.

Se ha desarrollado un código, que permite efectuar la cartografía geológica de zonas marinas. A diferencia del método tradicional, a través de este procedimiento se tienen en cuenta las variaciones laterales de facies. Asimismo, se controla y minimiza el error estadístico cometido en el proceso. Con el fin de analizar su validez, se han comparado los resultados obtenidos en un área determinada, poniéndose de manifiesto la conveniencia del método propuesto.

*Palabras clave:* Cartografía del fondo marino, Simulación numérica, Algoritmo de interpolación de superficies, Programa de ordenador.

### A B S T R A C T

This paper looks for, taken profit of the ever increasing calculation power of computers, to apply mathematics at the geological study of oceanic basins and continental margins and generally, to any area covered by a layer of water over which underwater research is carried out, looking besides for a model to help getting a deeper knowledge allowing even new prediction stages.

A code has been developed that allows to make offshore geological cartography. Unlike traditional method, with this process lateral variations of facies are taken into account. Moreover, error committed is minimised and controlled. Obtained results in a determined area have been compared to analyse their validity, looking out the convenience of the computer assisted method.

*Key words:* Sea's underground cartography, Numerical simulation, Surfaces interpolation algorithm, Computer program.

### 1. INTRODUCCION

El objetivo de la Geología Marina, es el conocimiento geológico de los márgenes continentales y su relación con las formaciones terrestres, y de los fondos oceánicos. El margen continental comprende la franja costera del interior, así como la plataforma, ascenso y talud continentales.

El citado conocimiento comprende la morfología del fondo y subfondo marinos, estructura del basamento, edad y potencia de las distintas unidades sedimentarias, etc. encaminado a la obtención de la infraestructura básica imprescindible para la ejecución de futuros trabajos tecnológicos, entre los que cabe citar la delimitación y caracterización de los recursos minerales susceptibles de aprovechamiento (investigación minera), el estudio geotécnico y de riesgos de determinadas áreas, estudios de contaminación y medioambiente, etc.

(\*) Ministerio de Industria y Energía.  
(\*\*) Dpto. de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Madrid.  
(\*\*\*) Instituto Tecnológico Geominero de España.

La metodología de estudio se caracteriza por la

gran utilización que se hace de los métodos geofísicos, los cuales sólo proporcionan una observación indirecta, por lo que su desarrollo ha estado condicionado a la evolución de la Física. Los trabajos se realizan en etapas sucesivas utilizando medios específicos en cada una de ellas en función de la batimetría, quedando los resultados reflejados en diferentes tipos de mapas (batimétricos, morfológicos, sedimentológicos, de isopacas, etc.). A grandes rasgos, los métodos empleados para la toma de datos se agrupan de la siguiente forma:

- Métodos indirectos: Son los geofísicos, como la gravimetría y la magnetimetría, pero sobre todo, la sísmica de reflexión continua, que puede ser la convencional empleada en las investigaciones petrolíferas y la de alta resolución.
- Métodos directos: Estos son los sondeos (profundos y petrolíferos), la toma de muestras superficiales (dragas y testigos de roca), los testigos de pistón (Kullenberg), de gravedad, etc. y los vibrosondeos.

Ambos son complementados por los sistemas de posicionamiento, que se agrupan según la precisión requerida y la distancia a la costa. Los más utilizados son los sistemas de radioposicionamiento (SYLEDIS, MAXIRAN, etc.).

Así pues, se dispone actualmente de una completa variedad de "hardware", equipos y técnicas de geofísica de una versatilidad creciente para las investigaciones submarinas. Los fondos marinos se pueden estudiar utilizando ecosondas, "pingers", "boomers", "sparkers", magnetómetros y sonars de barrido lateral (side scan sonar), desde barcos cuya posición geográfica se conoce de una forma precisa. Esta actividad se complementa con el muestreo directo de los sedimentos superficiales, testigos, sondeos, e incluso la observación directa por medio de buceadores y sumergibles equipados con cámaras de televisión.

El objetivo que aquí se persigue es la elaboración de unos estudios y metodologías que den como resultado el desarrollo de un código que permita la simulación de los horizontes geológicos. Para la interpolación de los datos basados en las

líneas de navegación, se han de desarrollar unos algoritmos de tipo interpolatorio para el tratamiento de los perfiles geofísicos, una vez interpretados.

La necesidad del código que se propone, llamado "Geo-Line", surge tras comprobar que los programas comerciales especializados como "RockWare" [1], no se ajustan de forma adecuada a la interpolación de los perfiles y los resultados obtenidos no son los óptimos. Se ha conseguido una herramienta integral y específica para geología marina, que es fácilmente utilizable y ampliable a las futuras necesidades, y que no requiere un equipo caro y especial. Todo ello ha constituido la Tesis Doctoral de González García [2] y a partir de dicho trabajo se ha realizado un simulador de fácil manejo de modo que las personas que lo usen no tengan que saber programarlo. El simulador se ha diseñado de forma que el usuario sea capaz de aprender a usarlo fácil y rápidamente, es decir, lo que se conoce en el diseño como un código en "entorno amigable".

## 2. ALGORITMOS INTERPOLATORIOS

Ya se sabe que cualquier interpolación nace de considerar que la variable que se quiere interpolar influye sobre su entorno más próximo. De esta forma se puede pasar de unos puntos-dato, en este caso "fixes" o puntos de disparo (shotpoints), distribuidos de forma aleatoria por el plano, a una distribución homogénea o equiespaciada, tal y como se muestra en la figura 1, que en lo sucesivo se denominará malla (grid).

Es importante definir adecuadamente tanto la continuidad de la variable que se quiere malla, como la escala de representación. Así, si la escala final va a ser 1:200.000, la separación entre "fixes" dentro de las líneas de navegación puede ser de doscientos a quinientos metros, siendo esta distancia más que suficiente para conseguir un buen resultado.

En el código Geo-Line se utilizan dos métodos de interpolación que presentan novedades respecto a los existentes. En el primero, la expresión interpolatoria está basada en el inverso de la distan-

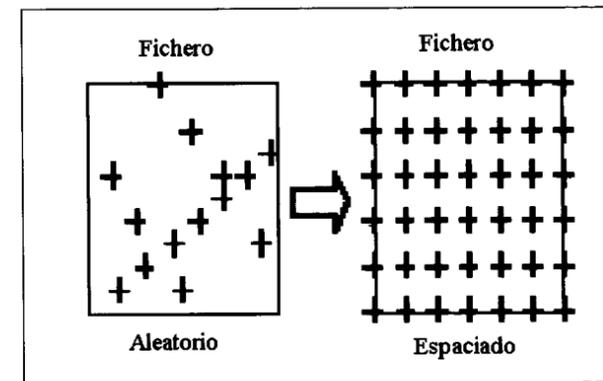


Figura 1

cia, evaluado según un coeficiente k. Viene dada por:

$$V_p = \frac{\sum_i \frac{V_i}{d_i^k}}{\sum_i \frac{1}{d_i^k}}$$

donde :

- $V_p$  es el valor de la variable interpolada en el punto P del plano, que tendrá unas coordenadas  $(x_p, y_p)$ , expresadas normalmente en U.T.M.
- $V_i$  es el valor del punto-dato de número i, que tendrá unas coordenadas  $(x_i, y_i)$ , en U.T.M. o en el mismo sistema que el punto P anterior.
- $d_i$  es la distancia entre los dos puntos anteriores, es decir, entre el punto-dato i y el punto que se quiere interpolar P:

$$d_i = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2}$$

En los programas comerciales como RockWare [1], el uso habitual de la fórmula interpolatoria expuesta, se realiza aplicando el sumatorio de la fórmula interpolatoria a todos los puntos-datos que se tengan, o que disten cierta distancia del punto geométrico que se quiere interpolar, reali-

zando una búsqueda radial. Aquí no se ha realizado así, pero se han conseguido obtener unos resultados con menor error.

Considerando de nuevo la expresión (inversa de la distancia al grado k):

$$z_p^* = \frac{\sum_i \frac{z_i}{d_i^k}}{\sum_i \frac{1}{d_i^k}}$$

Se puede ver que, los valores que se encuentran más cercanos al punto que se quiere interpolar son los que tienen más peso, o lo que es lo mismo, para un d, menor, mayor peso. Los puntos-dato que se pueden utilizar en esta expresión estarán limitados por una distancia máxima al punto que se quiere interpolar. Desgraciadamente también tiene un efecto negativo, como hacer que tienda a tomar el valor según sea la distribución de los datos que se usan en la fórmula (ver figura 2). Dicho de otro modo, si a la izquierda del punto que se quiere interpolar hay muchos puntos-dato y a la derecha pocos, la fór-

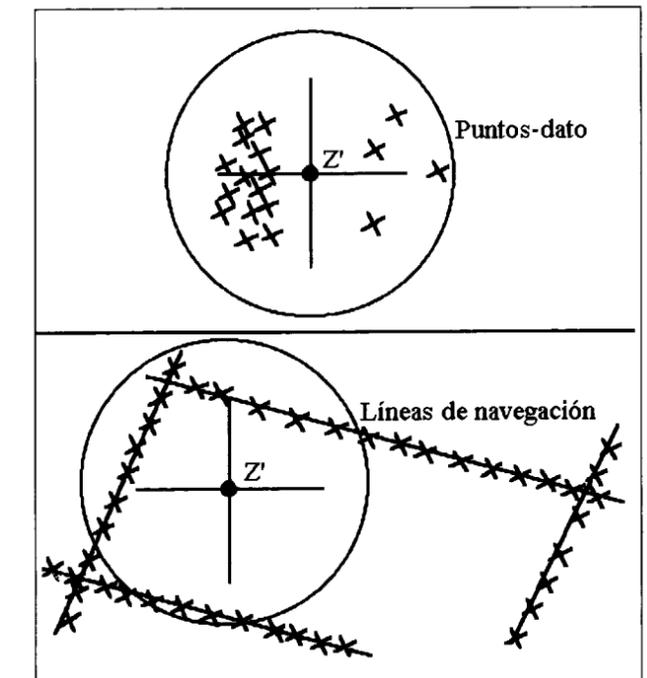


Figura 2

mula dará más peso a los puntos de la izquierda, ya que influyen más en el sumatorio de la fórmula.

Si los puntos-dato se encuentran ordenados en líneas de navegación pasará lo mismo. Como puede verse en la gráfica anterior, el valor dado por la fórmula interpolatoria estará forzado por la línea más cercana al punto que se quiera interpolar. De esta forma el resultado de la fórmula interpolatoria dependerá de la distribución de los datos y es lo que se va a denominar como error característico de esta fórmula interpolatoria.

Hay varias formas de corregir este error. El que resulta más inmediato es aplicar la fórmula, no sólo restringida por un radio de acción, sino también por unos sectores de tal modo que no se tomen más de un cierto número de puntos por cada sector, y así cada sector tendrá el mismo peso en la fórmula. Esto se muestra en la figura 3.

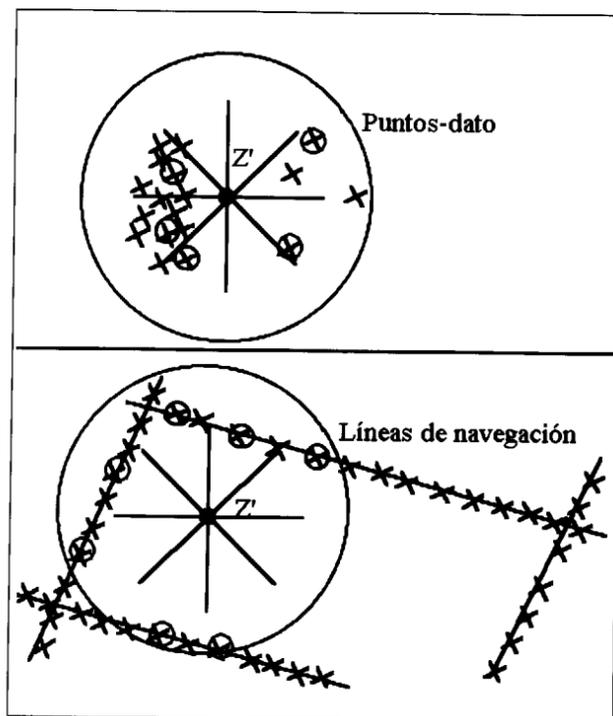


Figura 3

Ahora bien, de esta manera cabría preguntarse cuál de estos puntos-dato de los que se encuentran dentro de un radio y sector se elige para apli-

car la fórmula; bien el primero de los puntos-dato que se encuentre, o bien el más próximo al centro del sector. Además surge la cuestión de cómo expresar esto matemáticamente, de manera que se pueda programar de un modo rápido y sencillo. Demasiados problemas para resolverlos de modo que el resultado final sea viable.

Por lo que se ha optado es algo mucho más sencillo, aunque no aplicable a cualquier distribución de datos (por ejemplo, aleatoria). Se aprovecha la propia distribución de los puntos-dato, en este caso los "fixes" o "shotpoints", que se encuentran situados casi rectilíneamente en las líneas de navegación. De esta forma, los pasos que hace el organigrama de la función interpolatoria son:

- Encuentra las cuatro líneas de navegación más próximas al punto que se quiere interpolar.
- Para cada una de las líneas anteriores encuentra los "fixes" más cercanos al punto que se ha de interpolar (ver figura 4).
- La fórmula de la inversa de la distancia se aplica sólo para estos cuatro puntos.

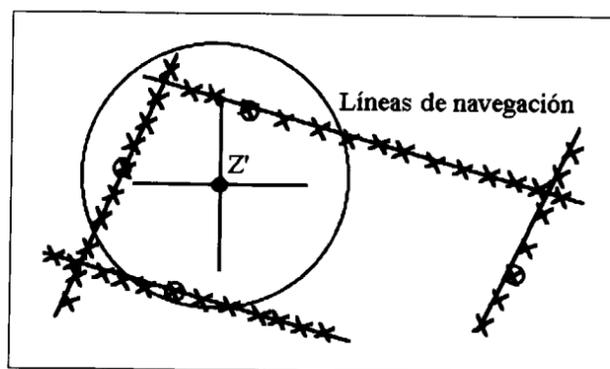


Figura 4

En la figura 5 se muestran dos mallados en representación caballera. El mallado A se ha realizado con el simulador empleando el algoritmo del inverso de la distancia, y el mallado B se ha realizado con RockWare [1] (módulo Gridzo), empleando también el inverso de la distancia pero seleccionando todos los datos que se encuentren dentro de la zona a mallar, más un intervalo de dos kilómetros. Ambos mallados, A y B, tienen

igual dimensión y situación geográfica, y para calcularlos se han interpolado el mismo número de puntos (tienen igual número de nodos).

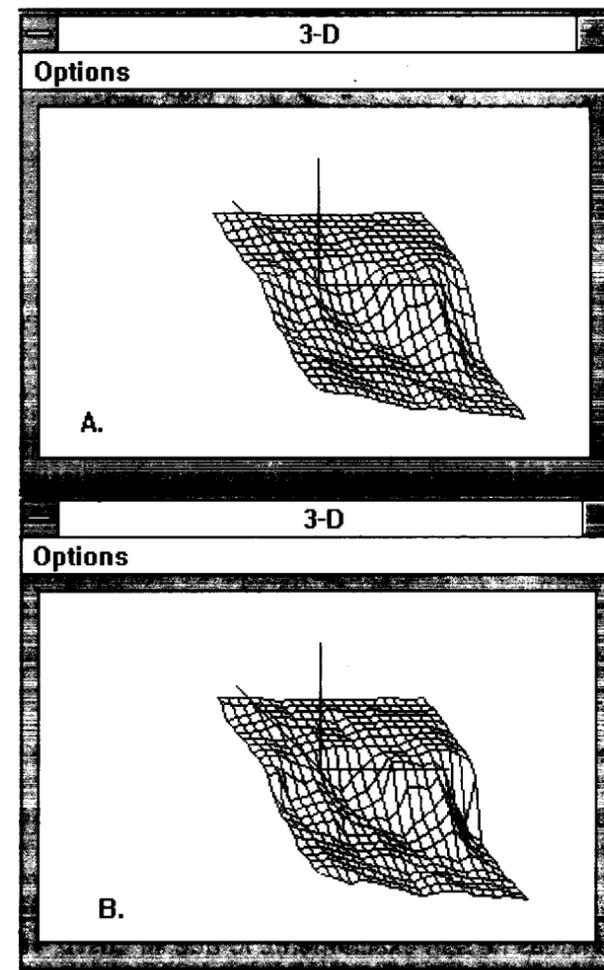


Figura 5

También puede verse que el mallado que se obtiene por el método seguido en el código fuente desarrollado resulta más suave, con menos saltos bruscos (teniendo en cuenta que la escala vertical está aumentada 40 veces). Esto resulta más adecuado para Geología Marina, ya que la pendiente media de la plataforma continental es pequeña (unos tres grados) y el talud continental de la península no llega a ser tan acusado como en otras zonas del globo. Además, las variaciones en dicha pendiente (segunda derivada) no llegan a ser importantes salvo en las

cercanías del talud, por esto un resultado más suavizado es más acorde con la morfología existente.

El código permite la entrada del grado k (ver expresión interpolatoria) a elección, lo que permite dar mayor o menor peso a las líneas-dato (líneas de navegación) más cercanas al punto a interpolar, y de este modo obtener un mallado ligeramente más o menos suavizado. Para la realización del mallado que aparece en la figura 5 se ha dado un valor de k=3.

Ya que la fiabilidad matemática no existe al no conocerse la medida real de batimetría en todos los puntos, lo que se ha de hacer es comparar los puntos-dato (x,y) de los que sí se conoce su batimetría (z), con el valor interpolado (z\*) que ofrece la malla interpolada, y representarlo por medio de un histograma de errores. La figura 6 muestra el histograma del error del mallado B, creado con RockWare [1].

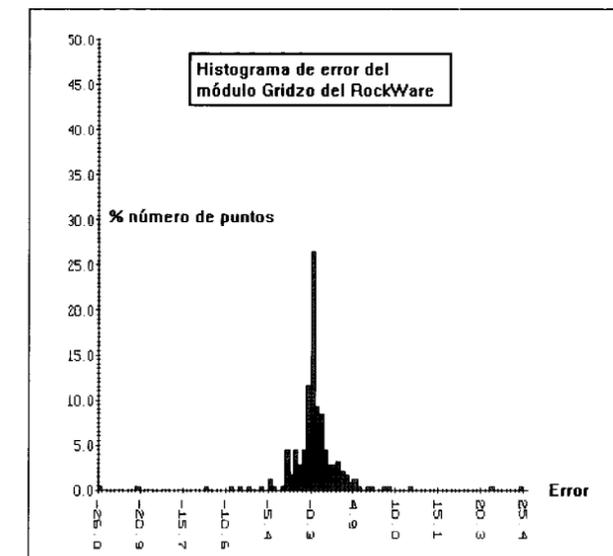


Figura 6

Comparando dos histogramas de error puede verse claramente que malla es más exacta, que será la que tenga un mayor porcentaje de puntos interpolados rondando el valor cero de error. Un mallado exacto será el que presente un histograma que sobre el error cero, contenga el cien por cien de puntos interpolados.

Como muestra el histograma de error del mallado creado por RockWare [1] (figura 6), el pico del gráfico no llega al 27 % de puntos que tienen un valor rondando a cero.

En la figura 7 se representa el histograma del error de la malla creada con el simulador desarrollado (Geo-Line). En éste, el valor de pico supera el 35 % de puntos interpolados que rondan el error nulo. Simplemente con este dato y comparándolo con el anterior, que era un 27 %, se puede decir que la interpolación realizada con el código creado es mejor, pues tiene un mayor número de puntos interpolados que tienen un error muy cercano al cero.

Los resultados muestran que, aun utilizando la misma expresión interpolatoria, los resultados mejoran sensiblemente si se aprovecha la distribución que poseen los datos, en forma de líneas de navegación.

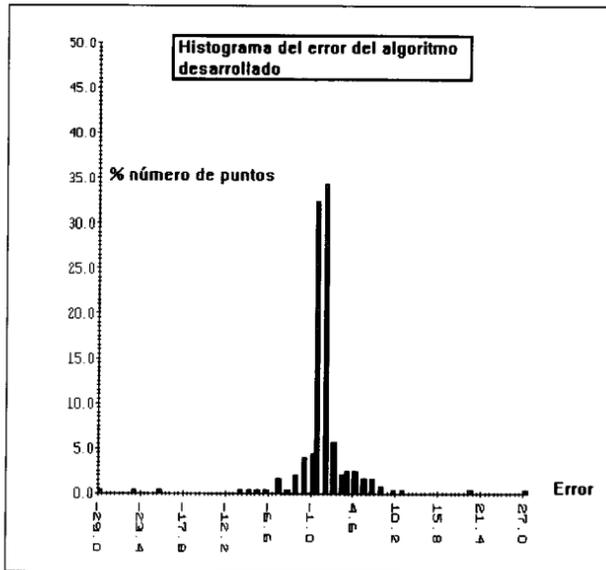


Figura 7

El segundo algoritmo de interpolación empleado por el código Geo-Line utiliza también la forma específica del soporte de interpolación. El algoritmo de Coons (Coons) [3] está basado en el concepto de superficie reglada. Se trata de encontrar una superficie  $Z(u,v)$  generada a partir de dos curvas  $f_1(u)$  y  $f_2(u)$ , estando  $u$  y  $v$  definidas en  $[0,1]$  (figura 8).

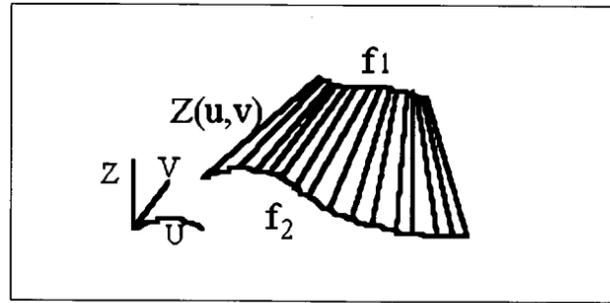


Figura 8

Se tiene que:

$$Z(u,0) = f_1(u)$$

$$Z(u,1) = f_2(u)$$

por lo que la superficie reglada  $Z(u,v)$  viene dada por la expresión:

$$Z(u,v) = (1-v)f_1(u) + vf_2(u)$$

$$\forall u,v \in [0,1]$$

Las superficies regladas son interpolaciones lineales ya que si se mantiene constante la variable  $u$  y se hace variar la  $v$  se obtienen segmentos rectos que unen las dos curvas-frontera  $f_1(u)$  y  $f_2(u)$ .

La diferencia fundamental con la interpolación basada en el inverso de la distancia es que ahora la interpolación no se basa en puntos, sino en curvas enteras. Por el contrario, las superficies regladas no son exactamente lo que se busca, ya que en este caso se tienen cuatro curvas-frontera.

Una vez visto que una superficie reglada interpola a dos curvas-frontera, y que lo que aquí interesa es una superficie que interpole a cuatro curvas-frontera, éstas serían cuatro tramos de líneas de navegación, siendo éstos los segmentos definidos por los puntos de corte consecutivos con las otras líneas.

El problema puede enunciarse de la siguiente manera: Encontrar la expresión de una superficie  $Z(u,v)$  que interpole a cuatro curvas-frontera  $f_1(u), f_2(u)$  y  $g_1(v), g_2(v)$  definidas sobre  $u, v$  pertenecientes a  $[0,1]$ . En la figura 9 se representan las cuatro curvas-frontera y la solución buscada.

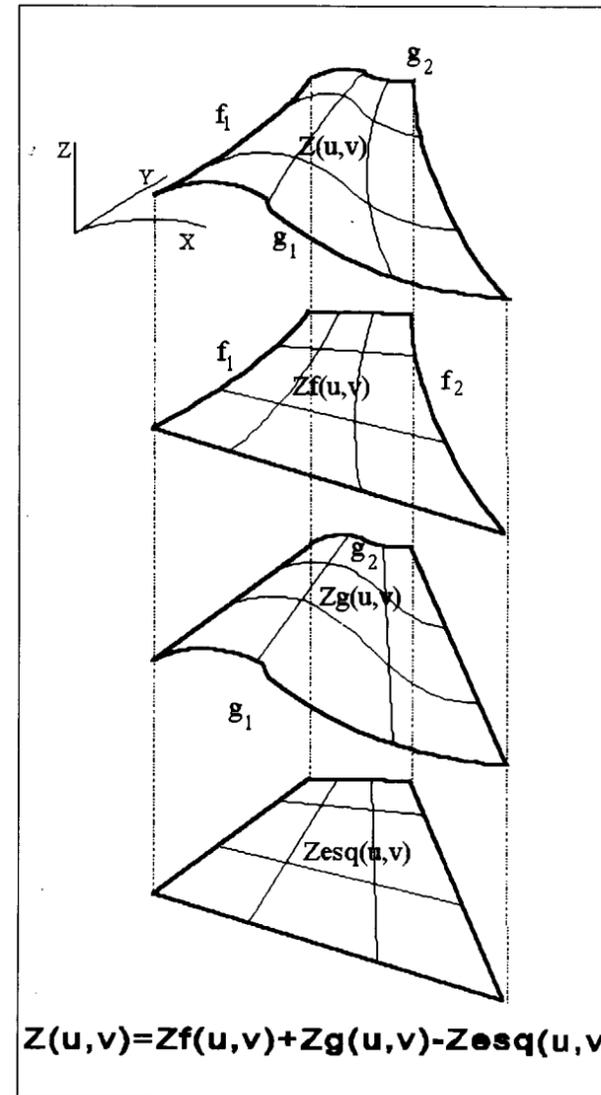


Figura 9

Es evidente que  $Z(u,v)$  ha de ser tal que

$$Z(u,0) = f_1(u) \quad ; \quad Z(u,1) = f_2(u)$$

$$Z(0,v) = g_1(v) \quad ; \quad Z(1,v) = g_2(v)$$

Para resolver el problema habrá que basarse en las expresiones de las superficies regladas y la expresión de la interpolación bilineal a las cuatro esquinas.

La superficie reglada formada a partir de  $f_1(u)$  y  $f_2(u)$  será  $Z_f(u,v)$ , tal como aparece a continuación.

$$Z_f(u,v) = (1-v)f_1(u) + vf_2(u)$$

Y de igual manera, la superficie reglada formada a partir de  $g_1(v)$  y  $g_2(v)$ ,  $Z_g(u,v)$ , será:

$$Z_g(u,v) = (1-u)g_1(v) + ug_2(v)$$

Puede verse que  $Z_f(u,v)$  interpola al par de curvas  $f(u)$  pero falla en las curvas  $g(v)$ , teniendo la situación inversa con  $Z_g(u,v)$ . Ambas curvas son correctas en dos lados pero fallan en los otros dos, donde son lineales, por lo que habrá que sumar lo que cada una de las superficies regladas interpola bien y eliminar o restar los fallos. Esto se puede hacer teniendo en cuenta que los fallos (o la superficie de fallos) es la superficie bilineal formada por las esquinas  $Z_{esq}(u,v)$ , cuya expresión es la siguiente:

$$Z_{esq}(u,v) = (1-u) \begin{pmatrix} Z(0,0) & Z(0,1) \\ Z(1,0) & Z(1,1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1-v \\ v \end{pmatrix}$$

Operando:

$$Z_{esq}(u,v) = (1-u)(1-v)f_1(0) + u(1-v)f_1(1) + (1-u)vf_2(0) + uvf_2(1)$$

Por lo tanto, la superficie buscada vendrá expresada como:

$$Z(u,v) = Z_f(u,v) + Z_g(u,v) - Z_{esq}(u,v)$$

Y en forma matricial:

$$Z(u,v) = (1-u) \begin{pmatrix} Z(0,v) \\ Z(1,v) \end{pmatrix} + (Z(u,0) \quad Z(u,1)) \begin{pmatrix} 1-v \\ v \end{pmatrix} - (1-u) \begin{pmatrix} Z(0,0) & Z(0,1) \\ Z(1,0) & Z(1,1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1-v \\ v \end{pmatrix}$$

Hay que decir que la expresión así obtenida es biparamétrica, debiendo diferenciar la función Z de la coordenada z, es decir, la expresión total de la superficie en paramétricas es:

$$Z(u, v) = \begin{cases} x = Z_x(u, v) \\ y = Z_y(u, v) \\ z = Z_z(u, v) \end{cases}$$

siendo  $Z_x$ ,  $Z_y$  y  $Z_z$  obtenidas a partir de la expresión en forma matricial arriba indicada (de la misma forma con  $Z_1(u,v)$ ,  $Z_2(u,v)$  y  $Z_{sq}(u,v)$ ).

Las funciones paramétricas se expresarán de la forma:

$$f_1(u) = \begin{cases} x = f_{1x}(u) \\ y = f_{1y}(u) \\ z = f_{1z}(u) \end{cases}$$

y análogamente,  $f_2(u), g_1(v)$  y  $g_2(v)$

3. RESULTADOS

Aplicando el algoritmo interpolatorio del inverso de la distancia, se muestra un mallado (dogrd. GRD) y su representación en caballera (figuras 10 y 11). Las figuras se obtienen directamente capturando las pantallas del simulador Geo-Line.

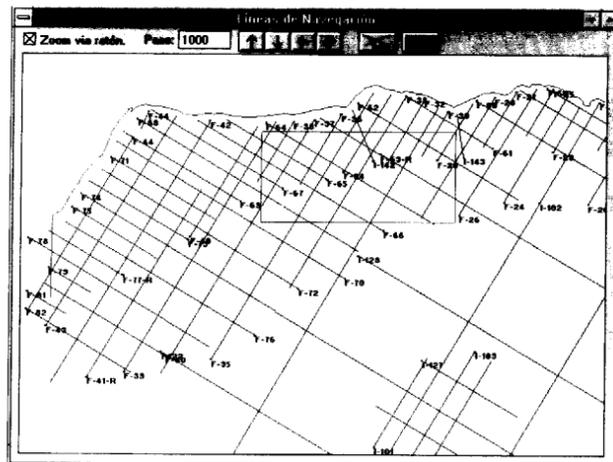


Figura 10 - Plano de situación del mallado. GRD

La zona del mallado corresponde a una parte del área considerada (Málaga-Granada), entre las coordenadas U.T.M mínimas (390 440, 4 050 399), y máximas (414 940, 4 061 899). El espaciamiento del mallado es de quinientos metros, tanto sobre el eje X como sobre el eje Y, siendo el número de nodos sobre dichos ejes 49 y 23 respectivamente, luego el número total de nodos interpolados es de 1.127.

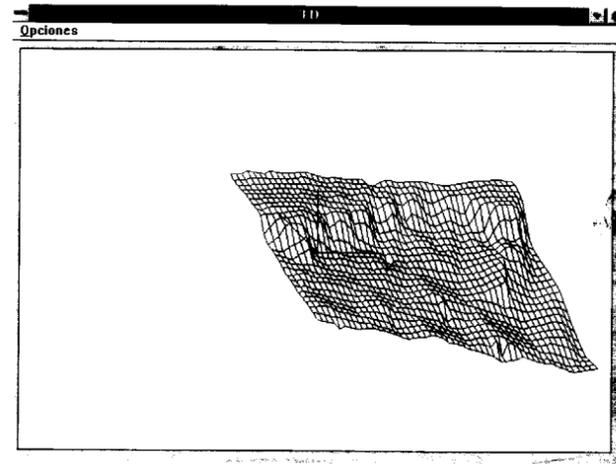


Figura 11 - Representación en caballera del mallado dogrd. GRD

A continuación se muestra otro ejemplo de comparación entre dos mallados, uno conseguido con RockWare [1] y otro con el simulador creado. Los límites de ambos mallados son iguales así como los datos de partida, que corresponden a la campaña de geofísica G-83-2. Los límites del marco del mallado están definidos por las coordenadas U.T.M., inferior izquierda (426 657, 3 997 601) y superior derecha (446 157, 4 009 101). En la figura 12 se muestra la situación del marco del mallado en el área de estudio.

Los mallados comparados se han realizado usando la fórmula del inverso de la distancia tomando el valor  $k=3$ . El mallado resultante del simulador desarrollado (Geo-Line) se ha representado en caballera en la figura 13, y a continuación en la figura 14 el mallado conseguido con el módulo Gridzo del RockWare.

Comparando ambas figuras puede observarse que, el mallado conseguido con el simulador Geo-Line presenta un aspecto más suavizado que el obtenido con RockWare.

Aunque la fórmula interpolatoria usada es la misma, el modo de seleccionar los puntos-dato no lo es, ya que mientras que el programa RockWare emplea los seis puntos-dato más cercanos al punto que se ha de interpolar, el simulador Geo-Line sigue el proceso descrito anteriormente.

En las figuras 15 y 16 aparecen los histogramas de error de los mallados.

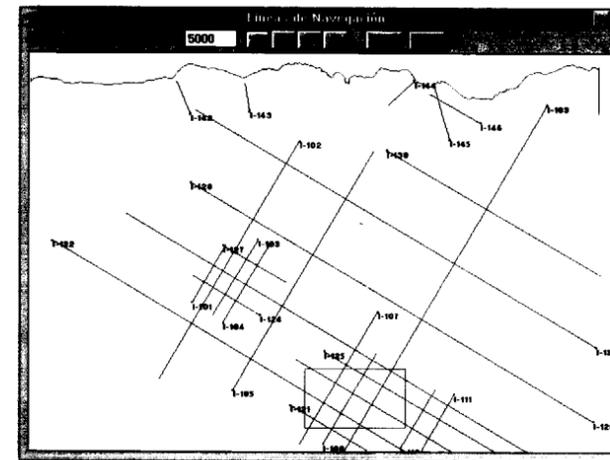


Figura 12

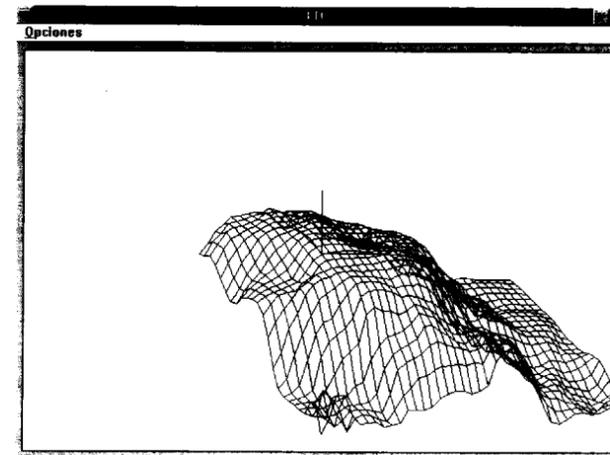


Figura 13

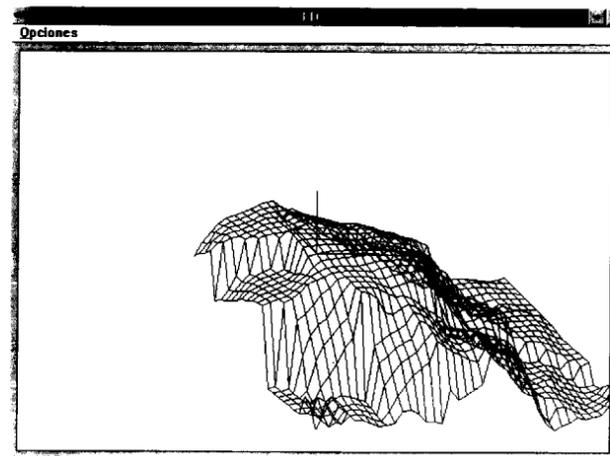


Figura 14

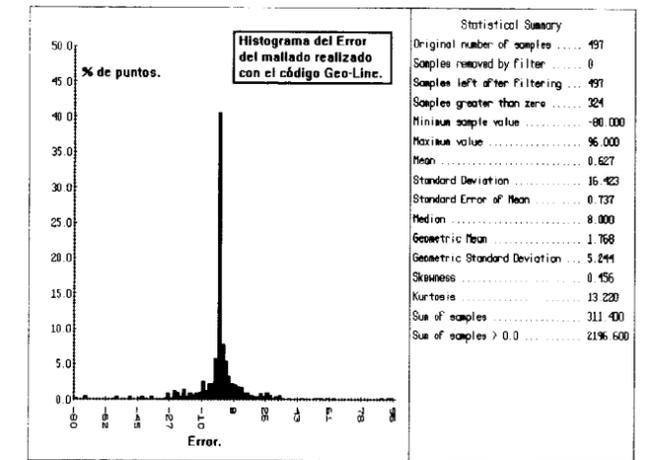


Figura 15

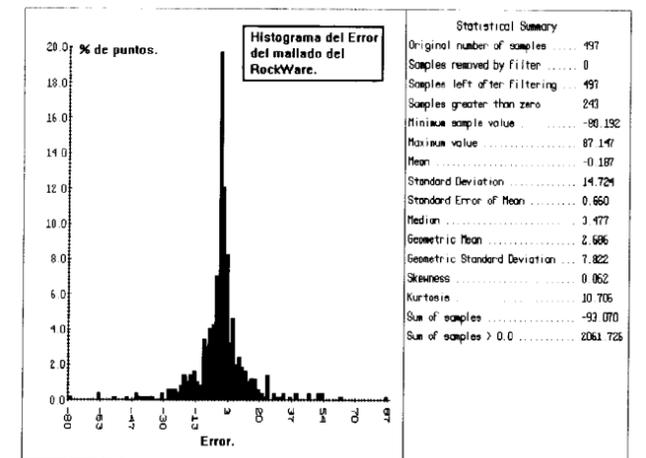


Figura 16

Los histogramas que aquí aparecen han sido dibujados con el módulo RockStat (estadística) del programa RockWare, pudiéndose comprobar que la interpolación realizada con el simulador Geo-Line tiene un 40 % de puntos con error nulo, mientras que la obtenido con Rockware tiene sólo el 20 %.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente artículo, se establece un procedimiento asistido por ordenador que mejora y agiliza la realización de la cartografía, permitiendo el proceso automático de los datos, la mejora de la interpretación y el empleo de estimadores, controlando y minimizando el error cometido en el proceso.

Seguidamente, basándose en una serie de algoritmos interpolatorios, se ha creado un simulador numérico de horizontes geológicos marinos. Asimismo, se ha calibrado el error cometido en la interpolación realizada por el simulador, al comparar el mallado obtenido con éste, con el obtenido con un módulo de cartografía digital de un programa comercial [1]. Al comparar los histogramas de error, los resultados obtenidos son óptimos con respecto al último.

Por otra parte, cuando se va a emplear el segundo algoritmo de interpolación propuesto, nos encontramos con que no se presentan curvas frontera definidas sobre una variable "u" de forma continua, sino que están definidas por medio de "fixes". Es decir que, por ejemplo, la curva  $f_1(u)$  vendrá dada como un conjunto de fixes contenidos en un fichero de datos cuyo nombre será un tramo de línea de navegación (por ejemplo el tramo 88, que se encuentra en el fichero "t- 88.trm"). Por ello se realiza previamente una interpolación spline para cada línea de navegación.

Aplicando esta metodología, se obtiene un mallado tal y como se muestra en la figura 17. Como se puede ver la interpolación obtenida se adapta perfectamente a los tramos de navegación, que son las curvas frontera que han servido para el cálculo.

Este algoritmo al utilizar toda la información disponible de las líneas de navegación (todos los

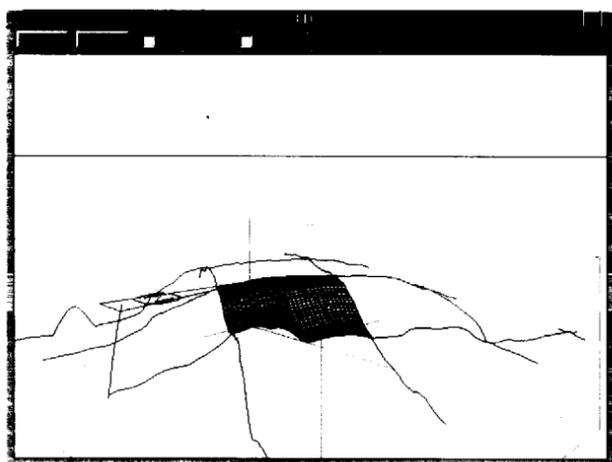


Figura 17

puntos-dato), se adapta perfectamente a la interpolación requerida, mejorando incluso la obtenida anteriormente, según el inverso de la distancia.

En este artículo se han descrito dos algoritmos interpolatorios que mejoran sensiblemente los programas de ordenador existentes [1], y que se adaptan perfectamente a la toma de datos que se realiza en geología marina. Estos algoritmos han sido implementados en el simulador numérico "Geo-Line", y con él se pueden realizar campañas de cartografía marina.

#### REFERENCIAS

- [1] RockWare, Inc. (1988). "RockWare's Module Gridzo manual (Gridding and Contouring Software)". RockWare Inc. U.S.A.
- [2] González García E. (1996). "Estudio Geomatemático Aplicado a la Geología e Investigación Minera Submarinas. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid.
- [3] Coons, S. (1974). "Surface Patches and B-Spline Curves". Computer Aided Geometric Design. R. Barnhill and R. Riesenfeld (eds.) Academic Press.

Original recibido: Marzo 1997.

Original aceptado: Mayo 1997.

## LOS EJEMPLARES TIPO Y FIGURADOS DE LAS COLECCIONES PALEONTOLOGICAS DEL MUSEO GEOMINERO.

### I. INVERTEBRADOS E ICNOFOSILES PALEOZOICOS.

Por I. RABANO y A. ARRIBAS (\*)

#### RESUMEN

Entre la colección de invertebrados e icnofósiles paleozoicos del Museo Geominero se ha detectado la presencia de 501 ejemplares figurados, de los que 135 son ejemplares tipo. Todos ellos son fósiles españoles, a excepción de 28 procedentes de Marruecos y del Sáhara Occidental. Los datos obtenidos se han almacenado en una base de datos temática, que permite un fácil acceso y consulta de la información.

El estudio de estas colecciones forma parte de un proyecto más amplio, en el que se contempla también la investigación de los fósiles e icnofósiles mesozoicos y cenozoicos, que supondrá la revalorización científica y patrimonial de los fondos del Museo Geominero.

*Palabras clave:* Ejemplares tipo, Ejemplares figurados, Colección paleontológica, Paleozoico, Museo Geominero, España.

#### ABSTRACT

Among the Palaeozoic invertebrate and ichnofossil collection of the Geominero Museum there have been recorded 135 type and 501 figured specimens. All of them come from Spanish localities, except for 28 from Morocco and the Western Sahara. A computer based maintenance system has been dedicated to these specimens, which will provide an easy retrieval of the information.

The research of the Palaeozoic collections fits into the framework of a broader project, dealing also with Mesozoic and Cenozoic type and figured specimens. It will imply the scientific and heritage revaluation of the collections housed at the Geominero Museum.

*Key words:* Type specimens, Figured specimens, Palaeontological collection, Palaeozoic, Geominero Museum, Spain.

#### INTRODUCCION

El Museo Geominero es depositario de importantes colecciones paleontológicas históricas, cuyo origen se remonta a los trabajos pioneros de la Comisión de la Carta Geológica (1849-1859), de las "brigadas geológicas" de la Junta General de Estadística (1859-1868), y de los diversos organismos precedentes del actual Instituto Tecnológico Geominero de España. Fruto de tan dila-

tada tradición es la constitución de una colección de fósiles españoles particularmente importante en cuanto a número, procedencia diversa de los fondos y carácter intrínseco de muchos de sus elementos.

La existencia de un patrimonio paleontológico de interés excepcional en el Museo Geominero se ha dado a conocer sólo desde fechas relativamente recientes (PEREJON, 1984; RABANO *et al.*, 1989; ARRIBAS y BERNAD, 1994; ARBIZU *et al.*, 1996; RABANO y ARRIBAS, 1996; BERNAD, 1997), ya que estos aspectos no habían sido valo-

(\*) Museo Geominero, Instituto Tecnológico Geominero de España, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid.

rados convenientemente hasta entonces. Como consecuencia de la realización del inventario general del Museo, iniciado en 1989, se ha detectado la existencia de un cierto número de elementos de gran interés científico, por constituir ejemplares tipos y figurados de gran relevancia taxonómica, que constituyen la referencia esencial o permiten la revisión de muchas especies paleontológicas. Parte de estos elementos se consideraban perdidos irremisiblemente, dado que el Museo no conservaba documentación complementaria acerca del origen detallado de los fósiles concretos presentes en sus fondos. Por ello, la investigación histórica en este caso requiere una ardua labor de confrontación directa de cada ejemplar con los ilustrados en las publicaciones de distintas épocas. Ello se inscribe en los objetivos de un proyecto específico que contempla, en tres etapas, el estudio de fósiles e icnofósiles paleozoicos, mesozoicos y cenozoicos, con vistas a la elaboración de los correspondientes catálogos cronológicos o de sistemática paleontológica. La publicación final de los mismos, en la línea de los editados por otros museos en todo el mundo, permitirá a la comunidad científica nacional e internacional acceder a esta información, tan necesaria en muchos trabajos paleontológicos.

En la presente nota se dan a conocer los resultados preliminares de la investigación de ejemplares tipo y figurados, detectados entre la colección de invertebrados e icnofósiles paleozoicos del Museo Geominero.

#### MATERIAL Y METODOS

La ausencia de cualquier tipo de documentación previa relativa a los ejemplares de la colección del Museo Geominero, que ni siquiera conservan su etiqueta original, obligó a plantear la investigación basándonos exclusivamente en la fisonomía del fósil y en las indicaciones acerca de su localidad de procedencia. Este último dato es con frecuencia fuente de incertidumbre, ya que sólo en contadas ocasiones aparece consignado directamente sobre la pieza, y casi siempre consta en la etiqueta moderna referido, en sentido amplio, a términos municipales o parajes con frecuentes errores de transcripción y ubicación provincial.

En este contexto, se optó por cotejar en detalle cada ejemplar con los ilustrados en aquellas publicaciones paleontológicas nacionales o extranjeras, que hicieran referencia explícita al depósito del material en el Museo, o bien cuyo autor o autores estuviesen vinculados en su momento con el *Instituto* o la *Comisión*. Con este fin, procedimos primero a localizar, y luego a evaluar, varios centenares de publicaciones susceptibles de contener datos acerca de ejemplares del Museo, obteniéndose los resultados que se presentan más adelante. A ellos se sumaron los depósitos bien documentados de otras colecciones modernas, ingresadas durante el último decenio en la institución.

La información obtenida está siendo almacenada en una base de datos de Microsoft Access, con las siguientes tablas de referencia: Cronología, Figurados, Ingreso, Localidad, Sistemática, Tipos y Ubicación Museo. Estas tablas compendian un total de 80 campos con la información básica para cada uno de los ejemplares figurados, a la que se añade la imagen original del mismo según constaba en su primera publicación.

#### HISTORIA DE LAS COLECCIONES

Las colecciones de la Comisión del Mapa Geológico sufrieron varios traslados hasta que en 1926 quedaron definitivamente emplazadas en la sala que ocupa el Museo Geominero, y en otras dependencias del mismo edificio. La formación del Museo en su actual configuración se debe en gran medida a la labor de Primitivo HERNANDEZ SAMPELAYO (ALMELA, 1959), que a buen seguro reunió también la documentación correspondiente, según consta de forma indirecta en numerosos escritos. Sin embargo, muchas de las colecciones aportadas por el propio autor y otros trabajos diversos, donde se mencionaba de forma explícita al Museo como depositario del material, no se conservan hoy en día, y desaparecieron del mismo, junto con la documentación que sin duda existió, en el periodo comprendido entre 1960 y 1990. Las razones de esta desaparición fueron las diversas remodelaciones padecidas por las dependencias del Museo, en las que reiteradamente se eliminaron todos aquellos materiales paleontológicos

que hubiesen perdido sus datos de procedencia o no parecieran particularmente interesantes, salvándose a consecuencia de ello, tan sólo un pequeño porcentaje de la colección no expuesta en las vitrinas.

La última de estas "remodelaciones" tuvo lugar coincidiendo con las obras de acondicionamiento del Museo, inaugurado oficialmente en 1989 como Museo Geominero, y a punto de iniciarse su inventario general.

#### RESULTADOS

El examen de la colección de invertebrados e icnofósiles paleozoicos del Museo Geominero, ha permitido localizar hasta el momento 501 ejemplares figurados en 554 ocasiones, de los que 135 son ejemplares tipo, principalmente de taxones de nivel especie. Todos ellos son fósiles españoles, con la excepción de 28 ejemplares procedentes de Marruecos o del territorio del Sáhara Occidental.

En la fig. 1 se representan los porcentajes de estos ejemplares desglosados geocronológicamente, con lo que se observa que más de la mitad proceden de localidades del Paleozoico inferior, y que hasta el momento no existe ninguno del Pérmico.

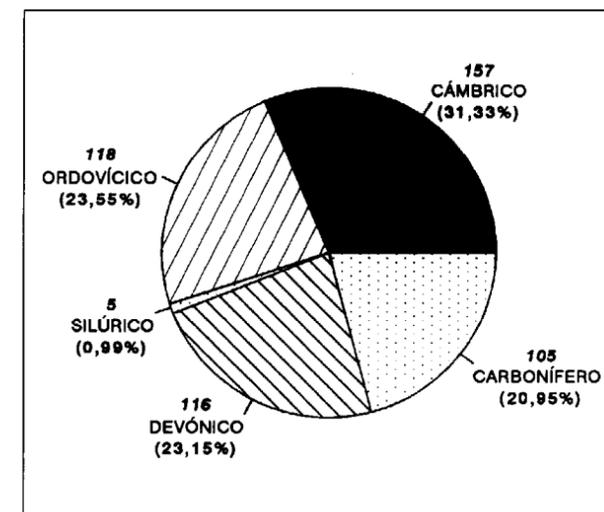


Fig. 1.- Porcentaje de ejemplares paleozoicos figurados.

En cuanto al origen geográfico de las muestras, la fig. 2 resume la ubicación de sus distintos yacimientos por Comunidades Autónomas, así como los procedentes de África.

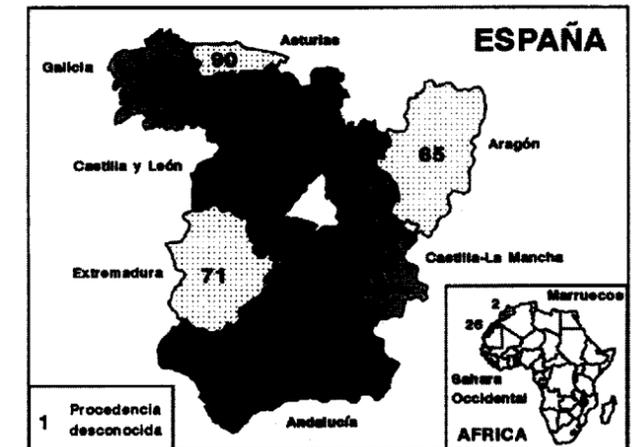


Fig. 2.- Distribución geográfica de los yacimientos de fósiles paleozoicos figurados.

En la fig. 3 se desglosan los ejemplares de invertebrados por grupos sistemáticos y clases mejor representadas; a ellos habría que sumar otros 10 elementos correspondientes a icnofósiles de invertebrados, no considerados en los diagramas.

En porcentaje de las distintas fuentes bibliográficas que refieren los ejemplares originales, la mayor parte corresponde a artículos de investigación publicados en revistas científicas o series monográficas. Estas se agrupan en más de una docena de títulos españoles, y algunos alemanes (*Palaeontographica*, *Beringeria*, *Geologica et Palaeontologica*) y holandeses (*Leidse Geologische Mededelingen*).

De pocos fósiles se tienen datos sobre las circunstancias de su ingreso en el Museo, debido a que sólo existe un pequeño inventario de la Junta General de Estadística, pero que no se refiere a piezas concretas (ARBIZU *et al.*, 1996). En el transcurso de nuestra investigación se ha logrado determinar, como referencia más antigua para un fósil paleozoico de la colección, el ejemplar MGM-212/O (fig. 4), correspondiente a una pieza con *Cruziana*, *Palaeophycus* y *Skolithos* del Ordovícico Inferior de Santa Cruz de Atea

que hubiesen perdido sus datos de procedencia o no parecieran particularmente interesantes, salvándose a consecuencia de ello, tan sólo un pequeño porcentaje de la colección no expuesta en las vitrinas.

La última de estas "remodelaciones" tuvo lugar coincidiendo con las obras de acondicionamiento del Museo, inaugurado oficialmente en 1989 como Museo Geominero, y a punto de iniciarse su inventario general.

**RESULTADOS**

El examen de la colección de invertebrados e icnofósiles paleozoicos del Museo Geominero, ha permitido localizar hasta el momento 501 ejemplares figurados en 554 ocasiones, de los que 135 son ejemplares tipo, principalmente de taxones de nivel especie. Todos ellos son fósiles españoles, con la excepción de 28 ejemplares procedentes de Marruecos o del territorio del Sáhara Occidental.

En la fig. 1 se representan los porcentajes de estos ejemplares desglosados geocronológicamente, con lo que se observa que más de la mitad proceden de localidades del Paleozoico inferior, y que hasta el momento no existe ninguno del Pérmico.

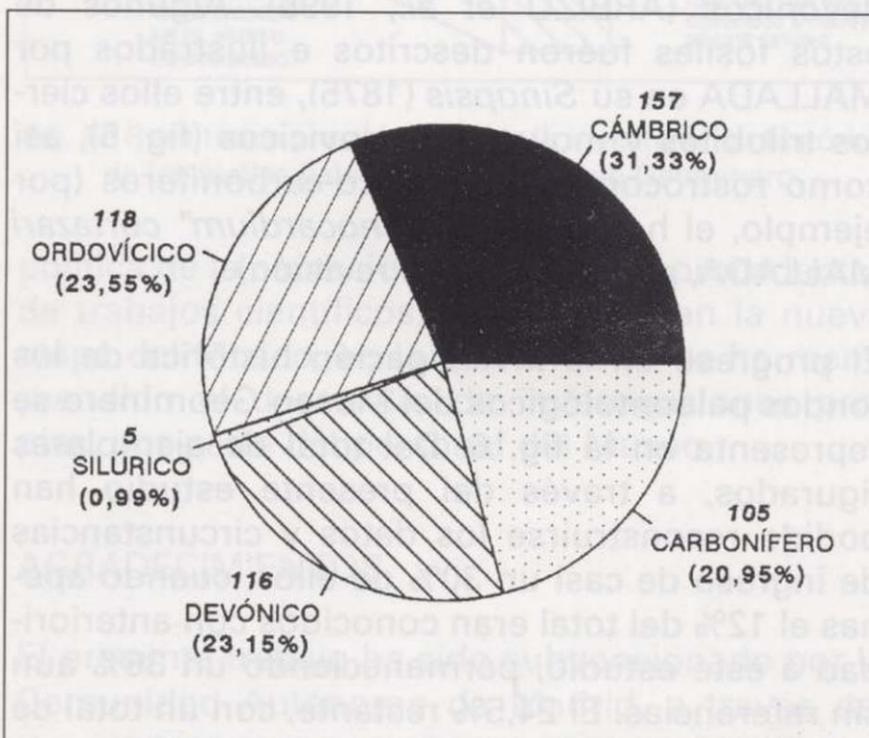


Fig. 1.- Porcentaje de ejemplares paleozoicos figurados.

En cuanto al origen geográfico de las muestras, la fig. 2 resume la ubicación de sus distintos yacimientos por Comunidades Autónomas, así como los procedentes de Africa.

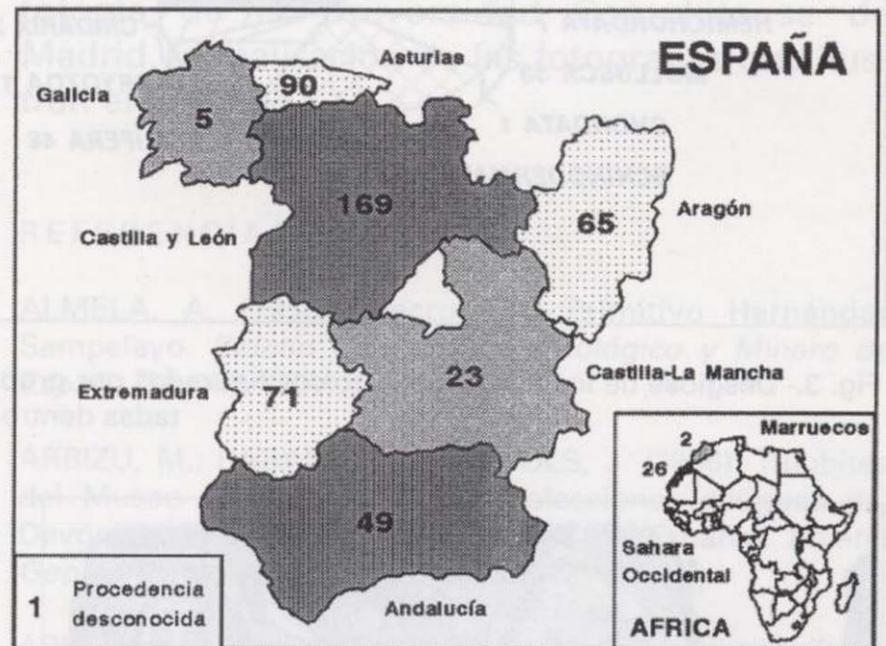


Fig. 2.- Distribución geográfica de los yacimientos de fósiles paleozoicos figurados.

En la fig. 3 se desglosan los ejemplares de invertebrados por grupos sistemáticos y clases mejor representadas; a ellos habría que sumar otros 10 elementos correspondientes a icnofósiles de invertebrados, no considerados en los diagramas.

En porcentaje de las distintas fuentes bibliográficas que refieren los ejemplares originales, la mayor parte corresponde a artículos de investigación publicados en revistas científicas o series monográficas. Estas se agrupan en más de una docena de títulos españoles, y algunos alemanes (*Palaeontographica*, *Beringeria*, *Geologica et Palaeontologica*) y holandeses (*Leidse Geologische Mededelingen*).

De pocos fósiles se tienen datos sobre las circunstancias de su ingreso en el Museo, debido a que sólo existe un pequeño inventario de la Junta General de Estadística, pero que no se refiere a piezas concretas (ARBIZU *et al.*, 1996). En el transcurso de nuestra investigación se ha logrado determinar, como referencia más antigua para un fósil paleozoico de la colección, el ejemplar MGM-212/O (fig. 4), correspondiente a una pieza con *Cruziana*, *Palaeophycus* y *Skolithos* del Ordovícico Inferior de Santa Cruz de Atea

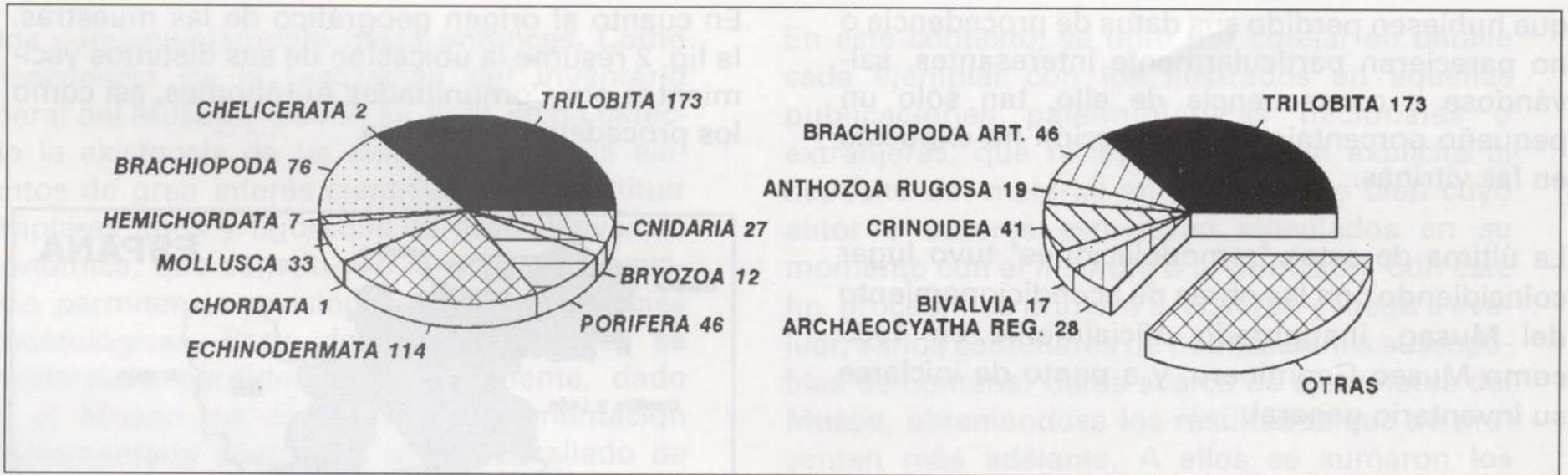


Fig. 3.- Desglose de los fósiles paleozoicos figurados por grupos sistemáticos, a nivel de filum (izquierda) y clases mejor representadas dentro de ellos (derecha).



Fig. 4.- *Cruziana furcifera* D'Orbigny, *Palaeophycus* isp. y *Skolithos* isp., muestra MGM-212/O procedente del Ordovícico Inferior de Santa Cruz de Atea (Zaragoza). El ejemplar fue examinado por VERNEUIL en 1867, y su original se muestra aquí junto con la ilustración publicada por DONAYRE (1873: lám. 1ª, fig. 2b).

(Zaragoza), publicada por DONAYRE (1873: lám. 1ª, fig. 2b). RABANO *et al.* (1989) dieron cuenta también del hallazgo, en la colección petrológica original del trabajo de SCHULZ (1835), de los fósiles citados por aquel autor en el Ordovícico Medio del oeste de la provincia de Lugo (sinclinal de Villadrid), que hasta entonces no habían sido descritos ni figurados.

Una mención especial merece también la colección reunida por los miembros de la Comisión de la Carta Geológica y por los componentes de las "brigadas geológicas" de la Junta General de Estadística (PRADO, MALLADA, CORTAZAR, BOTELLA, BAUZA, GONZALO Y TARIN, etc.), que en parte se conserva en el Museo y cuya revisión ha sido iniciada con el estudio de los trilobites devónicos (ARBIZU *et al.*, 1996). Algunos de estos fósiles fueron descritos e ilustrados por MALLADA en su *Sinopsis* (1875), entre ellos ciertos trilobites y moluscos ordovícicos (fig. 5), así como rostroconchas devónico-carboníferos (por ejemplo, el holotipo de "*Conocardium*" *cortazari* MALLADA, actualmente en revisión).

El progreso en la investigación histórica de los fondos paleontológicos del Museo Geominero se representa en la fig. 6. Del total de ejemplares figurados, a través del presente estudio han podido reconstruirse los datos y circunstancias de ingreso de casi un 30% de ellos, cuando apenas el 12% del total eran conocidos con anterioridad a este estudio, permaneciendo un 36% aún sin referencias. El 24,5% restante, con un total de 123 ejemplares figurados, ha ingresado en la colección durante 1996, como consecuencia de la

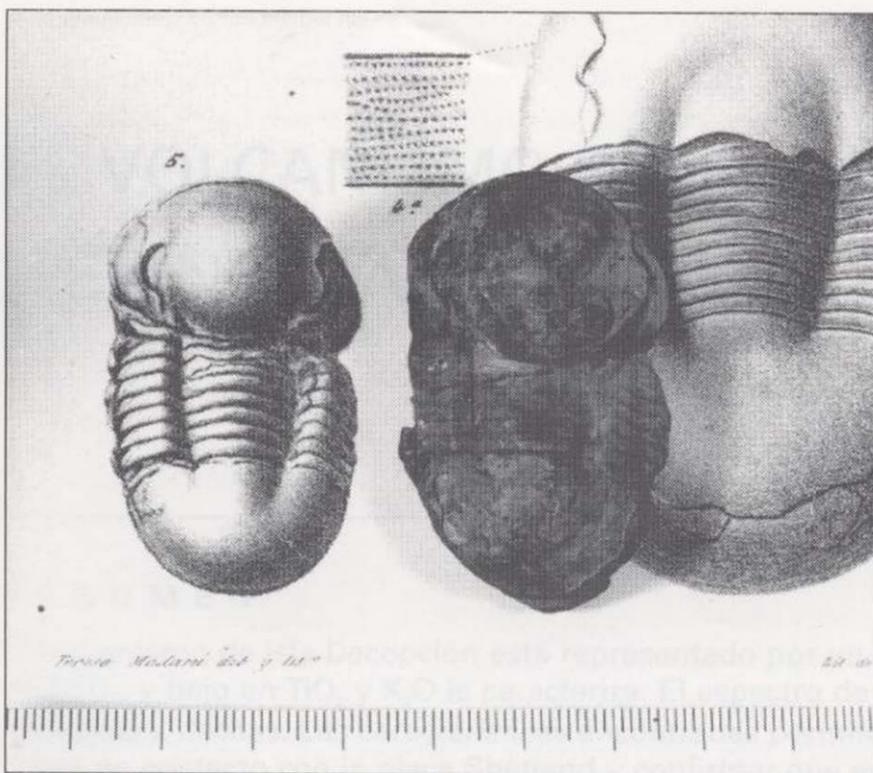


Fig. 5.- *Panderia beaumonti* (Rouault), ejemplar MGM-475/O, procedente del Ordovícico Medio de Fontanosas (Ciudad Real). Ilustración original de "Illaenus sanchezi Barr. et Vern." de MALLADA (1875: lám. 4, fig. 5), y aspecto actual del mismo ejemplar.

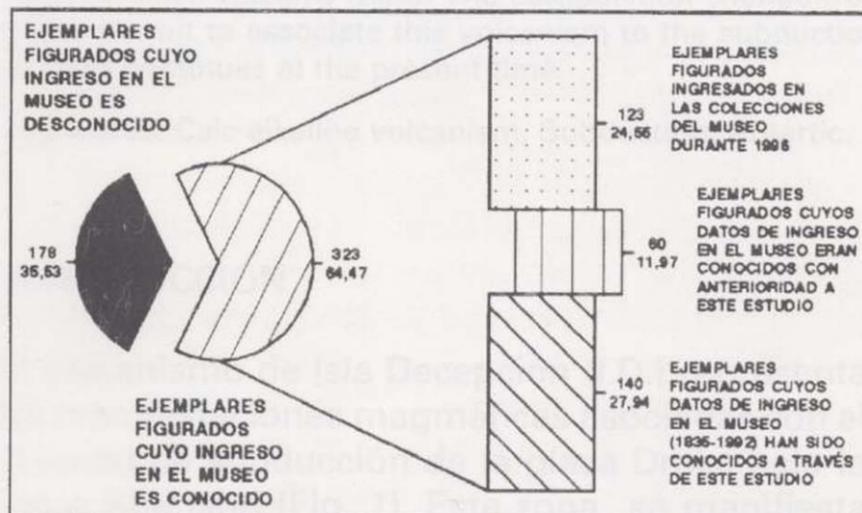


Fig. 6.- Resultados provisionales de la investigación histórica de los fósiles paleozoicos del Museo Geominero.

política de la captación de depósitos procedentes de trabajos científicos, emprendida en la nueva etapa del Museo, en la que también se ha reemprendido el desarrollo de investigaciones propias, por parte del personal del Museo.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido subvencionado por la Comunidad Autónoma de Madrid, a través del

Proyecto 05P/006/96 de la Dirección General de Investigación (Consejería de Educación y Cultura), dentro del Programa de Investigación en Humanidades y Ciencias Sociales. Agradecemos a Uly Martín y al Departamento de Paleontología de la Universidad Complutense de Madrid, la realización de las fotografías que ilustran el trabajo.

#### REFERENCIAS

ALMELA, A. (1959). Necrología. Primitivo Hernández Sampelayo. *Boletín del Instituto Geológico y Minero de España*, **70**, XIII-XXIV.

ARBIZU, M.; RABANO, I. y TRUYOLS, J. (1996). Trilobites del Museo Geominero. II. Las colecciones antiguas del Devónico de la Cordillera Cantábrica (N. España). *Boletín Geológico y Minero*, **107** (1), 3-13.

ARRIBAS, A. y BERNAD, J. (1994). Catálogo de mamíferos pliocenos del yacimiento de Villarroya (La Rioja) en la colección del Museo Geominero. *Boletín Geológico y Minero*, **105** (3), 236-248.

BERNAD, J. (1997). Catálogo de los bivalvos del Lías español depositados en el Museo Geominero (ITGE, Madrid). *Boletín Geológico y Minero*, **108** (1), 3-28.

DONAYRE, F.M. (1873). Bosquejo de una descripción física y geológica de la provincia de Zaragoza. *Memorias de la Comisión del Mapa Geológico de España*, **1**, 1-128.

MALLADA, L. (1875). Sinopsis de las especies fósiles que se han encontrado en España. Terreno Paleozoico. *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España*, **2**, 1-160.

PEREJON, A. (1984). Revisión de la colección de Arqueociatos del Museo del Instituto Geológico y Minero de España. *Boletín Geológico y Minero*, **95** (4), 337-353.

RABANO, I. y ARRIBAS, A. (1996). Invertebrados paleozoicos en la colección de ejemplares tipo y figurados del Museo Geominero (ITGE, Madrid). In T. PALACIOS y R. GOZALO (eds.), *Libro de Resúmenes, XII Jornadas de Paleontología*, Badajoz, 102-103.

RABANO, I.; GUTIERREZ MARCO, J.C. y ESTEBAN ARLEGUI, J. (1989). Los primeros fósiles encontrados en Galicia, redescubiertos en la colección Schulz del Museo Geominero (ITGE, Madrid). *Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, **14**, 159-166.

SCHULZ, G. (1853). *Descripción geognóstica del Reino de Galicia, acompañada de un mapa petrográfico de este país*. Madrid, Impr. de los Herederos de Collado, 1-52.

Original recibido: Febrero 1997.

Original aceptado: Abril 1997.

## EL VOLCANISMO DE ISLA DECEPCION (PENINSULA ANTARTICA).

Por A. APARICIO (\*), C. RISSO (\*\*), J. G. VIRAMONTE (\*\*\*),  
M. MENEGATTI (\*\*\*) e I. PETRINOVIC (\*\*\*)

### RESUMEN

El volcanismo de isla Decepción está representado por un conjunto de materiales toleíticos-calcoalcalinos. Un alto contenido en  $Al_2O_3$ , y bajo en  $TiO_2$  y  $K_2O$  le caracteriza. El espectro de composición química abarca desde basaltos, andesitas basálticas, andesitas a dacitas. Las características encontradas permiten asociar este vulcanismo a un proceso de subducción de la placa Drake en contacto con la placa Shetland y confirmar que este proceso continúa en la actualidad.

*Palabras clave:* Volcanismo calcoalcalino, Subducción, Antártida.

### ABSTRACT

The Deception island volcanism is constituted by tholeitic-calc-alkaline rocks. High  $Al_2O_3$  contents and low  $TiO_2$  and  $K_2O$  are features of these volcanic rocks. The composition change from basalts, basaltic andesites, andesites to dacites. These characteristics permit to associate this volcanism to the subduction process between the Drake and Shetland plates. The subduction process continues at the present time.

*Key words:* Calc-alkaline volcanism, Subduction, Antarctic.

### INTRODUCCION

El volcanismo de Isla Decepción (I.D.) representa las manifestaciones magmáticas asociadas con el proceso de subducción de la placa Drake bajo la placa Shetland (Fig. 1). Esta zona se manifiesta activa desde el Cretácico (González Ferrán (1985), Rex (1976), Trouw y Gamboa (1992)) e incluso para otros autores desde el Carbonífero (Storey y Garrett 1985). El proceso de subducción finaliza en los últimos 3-4 m.a (Smellie 1988, Barker 1970, 1982) aunque autores como Larter y Barker 1991, Maldonado et al 1992, Ortiz et al 1994, sostienen que continúa en la actualidad.

En este período reciente un proceso de rifting parece afectar al área del estrecho de Bransfield

(\*) Dpto. Volcanología. MNCN-CSIC. J. Gutiérrez Abascal, 2. Madrid 28006.

(\*\*) Dpto. Geología. Ftad. Ciencias Naturales. Univ. Buenos Aires (Argentina).

(\*\*\*) Universidad Nacional de Salta (Argentina).

(Baker et al. 1975, Fisk 1990, Pelayo y Wiens 1989, Acosta et al. 1990, 1992), siendo la I.D. el resultado de este proceso de extensión.

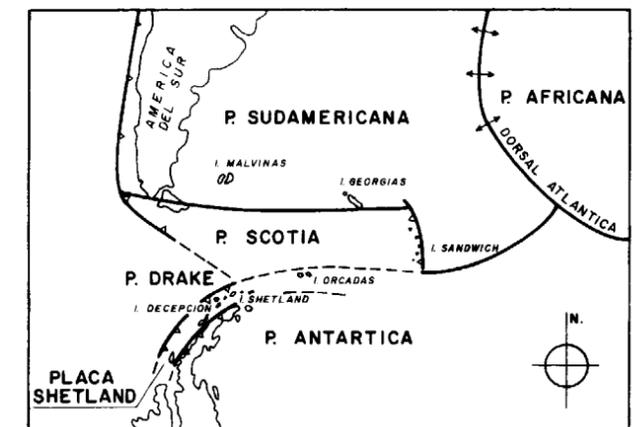


Fig. 1.-Esquema de situación de isla Decepción y principales zonas de subducción en el área considerada. (Modificado de Tarney et al. 1982).

I.D. conforma una estructura volcánica circular con una depresión central invadida por el mar. Para Holtedahl 1929, Olsacher 1956, González Ferrán et al. 1970, Baker et al. 1975... esta estructura define una caldera, mientras que otros autores (Hawkes 1961, Ortiz et al. 1992) apoyan más la idea de varios volcanes en subsidencia, ya que los sistemas de fracturas encontrados no corresponden con un modelo de caldera.

La estructura cortical del área de I.D. ha sido estudiada por Ashcroft 1972 y más recientemente por Guterch et al. (1985) que especifican un espesor cortical próximo a los 32 km. para este sector.

Una gran parte de la isla está construida por erupciones recientes y que han sido observadas por el hombre (1842, 1967, 1969, 1970), pero en general, todos los autores consideran que la isla está originada por un volcanismo muy próximo en el tiempo. En este sentido Keller et al. (1992) y Birkenmayer (1992) datan las erupciones más antiguas de la isla en unos  $150.000 \pm 46.000$  años.

Son numerosos los trabajos realizados sobre el volcanismo de I.D. y se puede encontrar una amplia descripción sobre los materiales aflorantes, litología, estructuras volcánicas, y tipos de erupción en González Ferrán y Katsui 1970, González Ferrán 1971, Baker et al. 1975, Viramonte et al. 1974, Baraldo 1989, Martí y Baraldo 1990, García et al. 1990, Birkenmajer 1992, Riso et al. 1992, 1994, Rey et al. 1995, entre otros.

Un esquema sobre las principales directrices de fracturación que condicionan el volcanismo de I.D. ha sido descrito por diversos autores. Entre otros, se destacan como sistemas principales N170-160 y N115-120 (Martí et al. 1990, Rey et al. 1990, 1995) sistemas que son igualmente reconocidos en áreas próximas (Santanach et al. 1992). Fracturas importantes de dirección NE-SO son igualmente destacadas por Ortiz et al. (1992).

## Geología

La mayor parte de los productos volcánicos emitidos corresponden a materiales de proyección aérea (piroclastos, escorias, bombas) siendo muy escasas las coladas lávicas. Son frecuentes las

erupciones de tipo hidromagmático bien por alcance del nivel freático, entrada de agua de mar o acumulación de hielo sobre el área eruptiva. Gran parte de los edificios volcánicos se encuentran muy destruidos como consecuencia de la acción glaciaria. En la Fig. 2 se han representado las principales formaciones y secuencias volcánicas en I.D. La etapa "inicial" está constituida por una serie potente de coladas piroclásticas (Fig. 3a) que conforman los principales acantilados al Norte y Oeste de la isla y posiblemente el Este aunque los frentes glaciares impiden la visión completa. Parte de estos materiales pueden también observarse en los escarpes de Bahía Fumarolas, mientras que se ven restos de edificios volcánicos emergidos en el frente del acantilado del Lago Irizar, Fuelles de Neptuno y en Bahía Fumarolas. Estos edificios están construidos principalmente por tobas palagonitizadas. La serie "inicial" finaliza con unas coladas lávicas de escaso espesor (5 a 15 metros) localizadas en el acantilado Oeste de la isla, encontrándose otros afloramientos, en el interior de la isla sobre el escarpe de Bahía Fumarolas. Un pequeño resto de esta serie puede corresponder al resto de lava aflorante en la base interior de Crater Lake.

A esta serie inicial le sigue la serie "crestas" que ocupa la mayor extensión de la isla y aflora, fundamentalmente, en las partes altas no ocupadas por el hielo. Sus materiales son siempre piroclastos de proyección aérea, en general muy alterados y transportados por la acción glaciaria. Algunos de sus edificios volcánicos, relativamente suavizados en su relieve por el hielo, se han representando en la Fig. 3b.

La siguiente etapa volcánica está constituida por los volcanes de la serie "Murature" (Fig. 3c) que manifiestan, al igual que en la serie anterior, escasa interacción con el agua, observándose en alguno de sus edificios (Cerro Caliente y Punta Entrada) actividad fumarólica. A veces dan pequeñas coladas de lava (Punta Descubierta). El mayor de estos edificios (Punta Entrada) es posible, dada la distribución de los materiales cratericos, que cerrara la entrada del mar a la isla, quedando un sector del edificio volcánico sumergido (entrada a Pto. Foster). A esta etapa pertenece el volcán dacítico de Cross Hill.

Un grupo de volcanes, relativamente bien con-

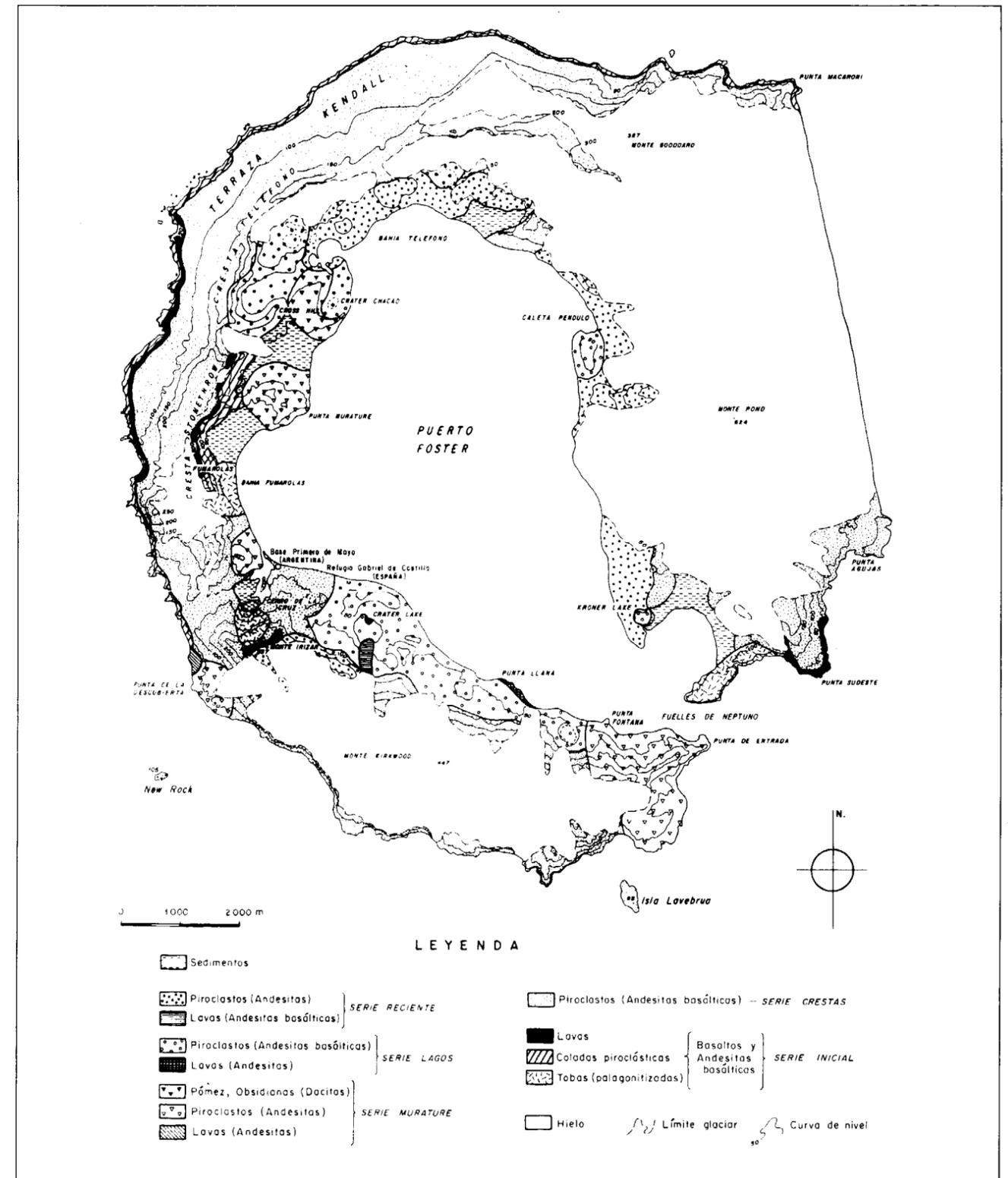


Fig. 2.- Esquema geológico de isla Deception.

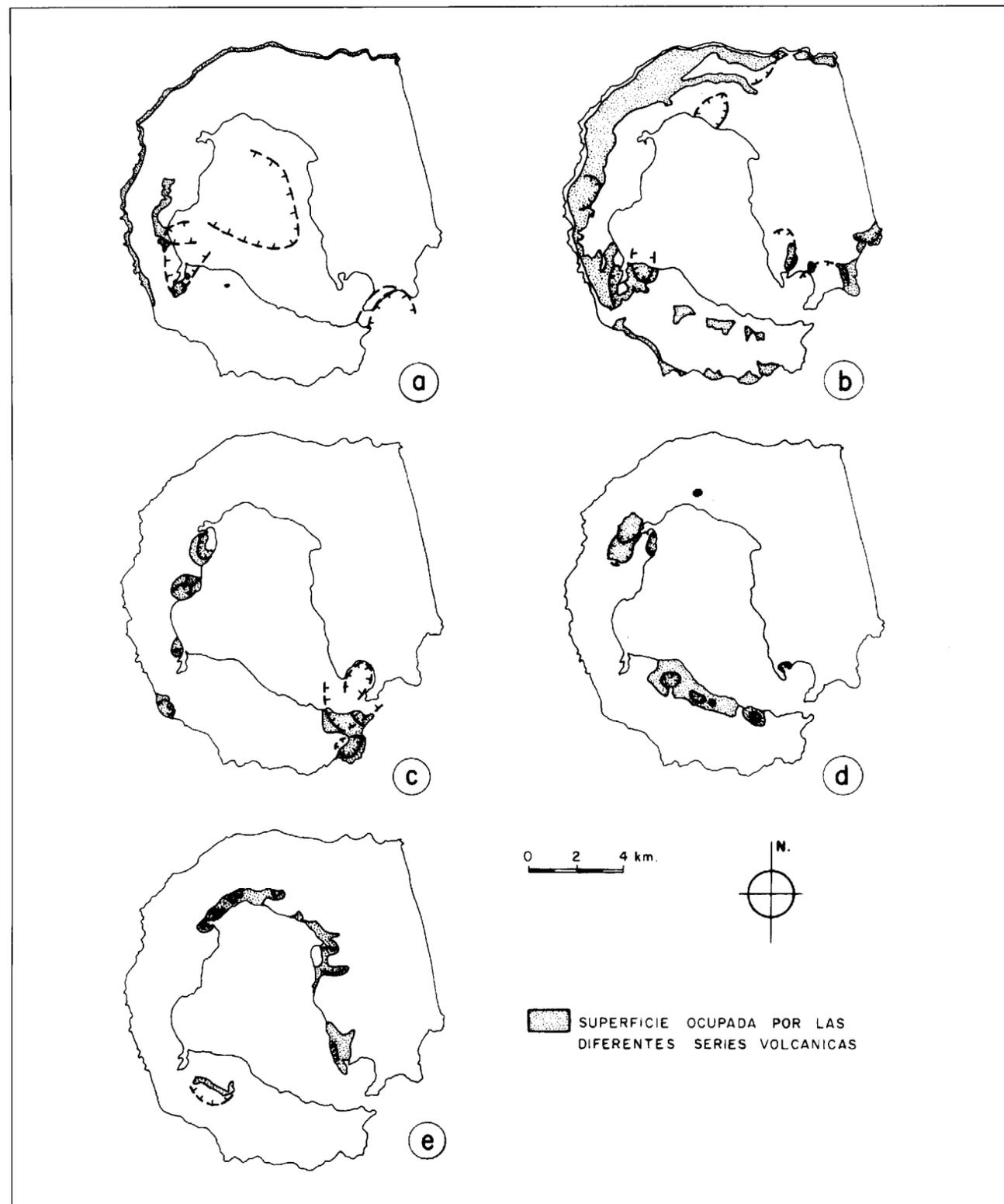


Fig. 3.- Zonas ocupadas por las diferentes etapas volcánicas con expresión de los principales edificios volcánicos asociados.

servados, corresponden a la serie "Lagos" (Fig. 3d), que ocupan la parte interior de la isla. Se trata de edificios relativamente recientes con características comunes de erupciones hidromagmáticas por entrada de agua de mar en el área cratérica, originando amplios cráteres de explosión. La colada de Punta Llana puede pertenecer a esta serie.

La serie "reciente" (Fig. 3e) la constituyen las erupciones históricas conocidas por el hombre (1842-1970). Salvo la de 1842 el resto ocupa el borde interno de la isla, formado por un numeroso conjunto de pequeños volcanes de emisión fisural.

### Litología

#### a) Rocas Volcánicas

Las rocas volcánicas aflorantes en I.D. corresponden a basaltos, andesitas basálticas, andesitas y dacitas, aunque este orden de rocas desde menos a más evolucionadas puede puntualmente no corresponder a su desarrollo en el tiempo.

Los basaltos se presentan como líticos en las erupciones más antiguas (Serie Inicial) y varían en su composición, de basaltos olivínicos a plagioclásicos, normalmente son de textura porfídica microcristalina (más escasos con pasta vítrea) en la que olivino, plagioclasa y clinopiroxeno constituyen los fenocristales, pudiendo variar fuertemente la proporción de olivino y plagioclasa. La pasta presenta los mismos minerales.

Las andesitas basálticas son rocas porfídicas con algún fenocristal de plagioclasa y clinopiroxeno en pasta de microlitos de plagioclasa, piroxeno, opacos y olivino (escaso) que varía de vítrea a hipocristalina y microcristalina. Los términos volcánicos más ácidos corresponden a dacitas que proceden de un único volcán (Crosshill). Se trata de rocas vítreas (pómez y obsidiana) con algunos microcristales-fenocristales de plagioclasa, ortopiroxeno, clinopiroxeno (augitas egirínicas) y opacos. La plagioclasa se presenta frecuentemente como cristales aciculares. A pesar de tratarse de las rocas más evolucionadas su momento de emisión no es reciente (Serie Murature).

#### b) Enclaves

Son poco frecuentes y es difícil asignarlos a volcanes determinados dada la imbricación entre edificios volcánicos y el transporte glaciar. Los encontrados corresponden a gabros, tonalitas y trondhjemitas.

Los gabros presentan variaciones desde términos ricos en plagioclasa, olivino, opacos y escaso anfíbol a gabros con plagioclasa, olivino y ortopiroxeno.

Enclaves más ácidos corresponden a tonalitas con una paragénesis de plagioclasa, cuarzo, hornblenda, biotita, opacos, apatito, circón y trondhjemitas que contienen plagioclasa mayoritaria (oligoclasa, andesina), anfíbol, ortopiroxeno, cuarzo (poco frecuente) y opacos.

### Quimismo mineral

Los principales minerales de volcanitas y enclaves fueron analizados por microsonda electrónica. De este modo se han obtenido datos de clinopiroxeno, olivino y plagioclasa en toda la serie volcánica observándose su variación composicional con el quimismo de la roca caja. Otros minerales más minoritarios como los opacos han sido igualmente analizados en rocas aisladas. En enclaves de gabros se analizaron olivino, piroxeno y plagioclasa, mientras que en tonalitas y trondhjemitas se estudiaron anfíbol, biotita, plagioclasa y ortopiroxeno.

### Piroxenos

En la tabla 1 se presentan análisis de clino y ortopiroxeno según la secuencia basaltos → andesitas basálticas → dacitas. En general se aprecia un aumento de los valores medios del contenido en Fe del clinopiroxeno desde los términos basálticos a dacíticos. Casi en su totalidad (Fig. 4) corresponden a augitas y en el diagrama Ti-Al total de Leterrier et al. 1982 (Fig. 5) se sitúan en el campo de piroxenos pertenecientes a rocas basálticas calcoalcalinas.

En enclaves, los piroxenos de gabros y trondhjemitas presentan valores intermedios de FeO y se

**Tabla 1**  
Piroxenos de rocas volcánicas y enclaves plutónicos de Isla Decepción. Fórmula en base a 6 oxígenos. (\*\*)

Muestra	BASALTOS			ANDESITAS BASÁLTICAS											
	5443	5448	6597	6602	6588	6468	6473	6596	6594	6600	5438	5437	5436	5440	5449
SiO <sub>2</sub>	51,09	48,64	50,51	50,11	50,41	53,62	53,35	50,88	48,18	50,34	50,27	47,87	51,56	50,45	50,04
TiO <sub>2</sub>	0,72	1,81	1,02	0,76	0,67	0,62	1,03	1,00	1,43	1,14	0,74	0,80	0,88	0,72	0,76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,95	3,81	2,56	2,56	2,55	2,73	3,59	2,35	4,85	2,82	2,77	2,93	1,59	4,08	2,33
FeO	9,69	9,13	8,39	8,19	8,07	5,20	8,41	8,24	10,27	8,39	9,00	9,13	11,16	6,50	8,01
MnO	-	-	0,19	0,15	-	0,10	0,11	0,17	0,19	-	-	-	-	-	-
MgO	18,08	15,15	16,32	15,97	16,01	16,14	17,08	17,19	13,38	16,33	17,64	16,82	16,28	17,15	17,64
CaO	19,12	19,64	19,54	20,24	21,86	21,49	13,67	18,94	20,62	19,84	20,19	21,62	19,63	20,98	21,32
Na <sub>2</sub> O	0,39	0,46	0,45	0,37	0,33	0,59	3,03	0,42	0,49	0,69	0,39	0,53	0,48	0,41	0,42
Total	101,00	98,68	99,02	98,36	99,92	100,44	100,30	99,23	99,44	99,58	101,04	99,74	101,61	100,31	100,54
Si	1,885	1,841	1,894	1,894	1,881	1,949	1,942	1,898	1,825	1,879	1,857	1,811	1,905	1,855	1,857
Al <sup>+</sup>	0,035	0,159	0,106	0,106	0,113	0,051	0,058	0,102	0,175	0,121	0,121	0,131	0,069	0,145	0,102
Al <sup>6</sup>	-	0,012	0,007	0,009	-	0,066	0,096	0,001	0,042	0,003	-	-	-	0,033	-
Ti	0,017	0,051	0,029	0,022	0,018	0,017	0,028	0,028	0,040	0,032	0,020	0,023	-	0,020	0,021
Fe	0,299	0,289	0,263	0,259	0,252	0,158	0,256	0,257	0,325	0,262	0,278	0,289	0,324	0,200	0,248
Mn	-	-	0,006	0,005	-	0,003	0,003	0,005	0,006	-	-	-	-	-	-
Mg	0,994	0,855	0,912	0,900	0,890	0,874	0,927	0,956	0,755	0,908	0,971	0,949	0,896	0,940	0,976
Ca	0,756	0,796	0,785	0,820	0,874	0,887	0,533	0,757	0,837	0,793	0,799	0,876	0,777	0,827	0,848
Na	0,028	0,034	0,033	0,027	0,023	0,036	0,214	0,030	0,036	0,050	0,028	0,039	0,034	0,02	0,030
%Fe	14,59	14,89	13,68	13,30	12,50	8,6	15,06	13,26	17,21	13,34	13,57	13,67	17,09	10,16	11,96
%Al	48,51	44,07	46,38	45,36	44,14	46,68	53,92	48,40	39,26	46,25	47,41	44,89	44,40	47,78	47,10
%Ca	36,89	41,03	39,92	41,33	43,35	44,71	31,00	38,32	43,52	40,39	39,01	41,43	38,50	42,04	40,92

**Tabla 1 (Continuación)**

Muestra	ANDESITAS				GABROS	TRONDHJEMITAS	ORTOPIROXENOS	ANDESITAS BASÁLTICAS	DACTITAS
	5450	6471	6590	6591	6444	5439		6469	6472
SiO <sub>2</sub>	49,58	51,22	49,75	50,29	51,74	50,18	47,10	53,10	
TiO <sub>2</sub>	0,59	1,43	0,69	0,47	0,48	0,67	0,19	0,30	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,51	2,82	2,45	1,00	1,83	1,59	0,26	0,50	
FeO	10,25	14,56	7,20	13,22	9,95	12,63	25,86	21,17	
MnO	-	0,31	0,12	0,08	-	-	-	-	
MgO	17,71	10,88	16,27	15,47	15,60	16,48	0,31	0,46	
CaO	20,04	18,37	22,57	17,72	18,54	19,20	25,70	22,90	
Na <sub>2</sub> O	0,40	0,56	0,38	0,41	0,41	0,48	0,82	1,84	
Total	100,12	100,19	99,47	98,70	98,55	101,27	100,35	100,31	
Si	1,864	1,938	1,867	1,926	1,949	1,877	1,810	1,969	
Al <sup>+</sup>	0,067	0,062	0,109	0,045	0,051	0,070	0,012	0,022	
Al <sup>6</sup>	-	0,064	-	-	0,031	-	-	-	
Ti	0,096	0,040	0,019	0,013	0,014	0,018	0,005	0,008	
Fe	0,322	0,461	0,226	0,423	0,313	0,395	0,831	0,656	
Mn	-	0,010	0,004	0,002	-	-	0,010	0,014	
Mg	0,992	0,613	0,910	0,883	0,876	0,919	1,472	1,266	
Ca	0,807	0,745	0,907	0,727	0,748	0,769	0,033	0,073	
Na	0,029	0,041	0,027	0,030	0,030	0,035	0,006	-	
Fe	15,18	25,75	11,23	20,88	16,15	18,96	-	-	
Mg	46,77	33,51	44,45	43,39	45,22	44,11	-	-	
Ca	38,04	40,73	44,30	35,72	38,61	36,91	-	-	

\* Analista: J. García Peña

\*\* Ver relación de muestras para todas las tablas al final del trabajo.

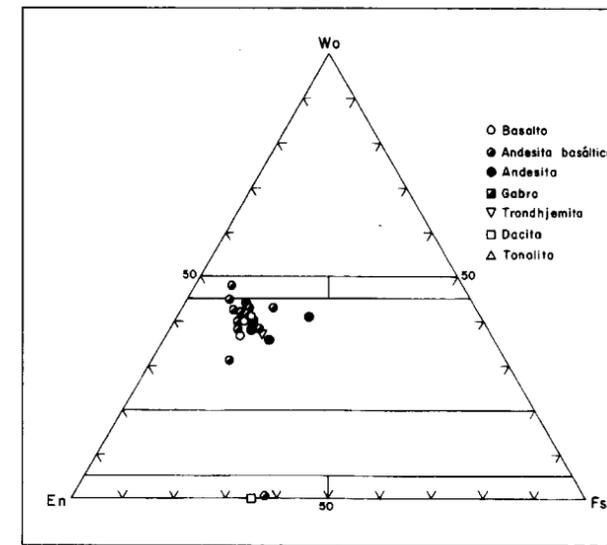


Fig. 4.- Triángulo de clasificación de clinopiroxenos (Wo-En-Fs), mostrando la composición augítica de los mismos. (Los símbolos usados son válidos para el resto de los diagramas).

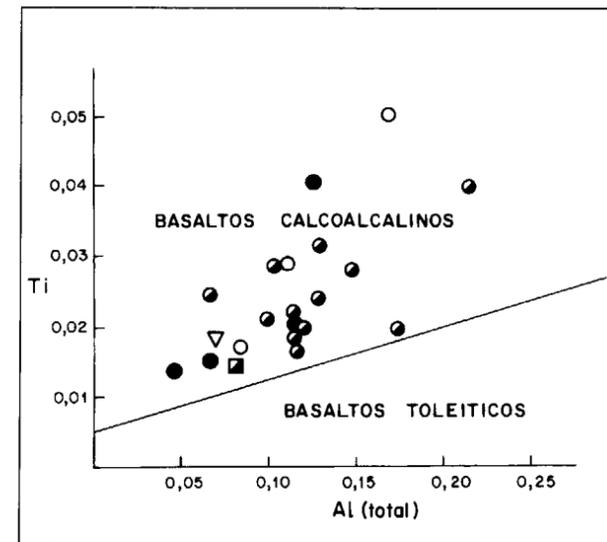


Fig. 5.- Diagrama Ti-Al<sub>total</sub> en clinopiroxenos de I.D., según Leterrier et al. (1982), indicando su pertenencia a series basálticas calcoalcalinas.

proyectan en el mismo campo que los piroxenos de las rocas volcánicas.

Ortopiroxenos han sido analizados en una andesita basáltica y en unas dacitas con valores de enstatita, 63 y 65 respectivamente.

Autores como Baker et al (1975) y Weaver et al.

(1979) han estudiado igualmente los piroxenos de las vulcanitas de I.D. Así Baker et al (1975) dan contenidos en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> variando de 4% a 6% y relaciones FeO/MgO entre 0,4-0,6. Exceptuando el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que es algo elevado, las relaciones FeO/MgO si concuerdan con lo observado en este caso.

Weaver et al. (1979) dan valores medios para estos clinopiroxenos de Fe<sub>12</sub> Mg<sub>46</sub> Ca<sub>42</sub>, muy similares a los aquí encontrados (Fe<sub>14</sub> Mg<sub>45</sub> Ca<sub>40</sub>). Estos mismos autores proponen, en base a los datos de estos piroxenos, la existencia de una serie volcánica única.

**Olivinos**

Al igual que los clinopiroxenos, se encuentran en toda la serie volcánica excepto en dacitas (tabla 2), sus contenidos en forsterita varían de Fo<sub>61</sub> a Fo<sub>88</sub> en las rocas volcánicas. Se observa una disminución del contenido forsterítico desde las rocas basálticas a las andesitas, con valores medios de Fo<sub>82</sub> en basaltos, Fo<sub>76</sub> en andesitas basálticas y Fo<sub>70</sub> en andesitas.

El olivino del gabro analizado presenta valores altos de Fo = 82-87.

Determinaciones ópticas de la composición del olivino realizadas por Weaver et al. (1979) dan valores sensiblemente inferiores del contenido en Fo a los aquí determinados, aunque expresan igualmente la tendencia a disminuir al avanzar en la serie hacia términos andesíticos.

**Plagioclasa**

El quimismo de estos minerales se indica en la tabla 3. En basaltos los contenidos de An varían de 64 a 90, en andesitas basálticas de 39 a 88, en andesitas de 39 a 53 y en dacitas (con sólo dos análisis) de 25 a 29. Los valores medios muestran un decrecimiento escalonado desde basaltos (An<sub>82</sub>), andesitas basálticas (An<sub>67</sub>), andesitas (An<sub>53</sub>) a dacitas (A<sub>27</sub>).

En enclaves de gabro los valores de plagioclasa (An<sub>87</sub>) están próximos a los encontrados en basaltos mientras que en trondhjemitas y tonalitas son

Tabla 2

Olivinos de rocas volcánicas y enclaves plutónicos de Isla Decepción. Fórmula en base a 4 oxígenos.

Muestra	BASALTOS								ANDESITAS BASÁLTICAS			ANDESITAS		GABROS	
	5448	5441	5443	6597	6595	6601	6598	6592	6600	6602	5437	6590	6589	5442	6444
SiO <sub>2</sub>	39,80	40,43	39,95	39,70	39,94	39,79	39,27	37,11	39,63	39,11	34,58	39,32	35,07	40,19	39,90
FeO	14,53	10,70	20,96	15,14	13,34	14,13	16,79	27,57	15,76	20,80	29,32	20,49	34,35	13,10	12,20
MnO				0,09	0,10	0,14	0,10								
MgO	43,88	49,00	40,77	45,57	46,44	45,78	43,31	35,52	44,82	40,90	35,76	41,19	31,38	46,46	47,26
CaO					0,18										
Total	98,25	100,13	101,68	100,51	100,03	99,86	99,57	100,19	100,21	100,81	99,66	97,67	100,80	99,75	99,36
Si	1,013	0,993	1,009	0,992	0,995	0,996	0,998	0,988	0,995	0,999	0,941	1,001	0,963	1,001	0,995
Fe	0,309	0,220	0,442	0,316	0,278	0,295	0,357	0,514	0,331	0,444	0,667	0,436	0,789	0,273	0,254
Mn				0,002	0,002	0,003	0,004								
Mg	1,665	1,794	1,537	1,697	1,724	1,708	1,641	1,410	1,678	1,557	1,451	1,563	1,284	1,725	1,756
Ca				0,005	0,005										
Fo	84,34	89,07	77,66	84,30	86,11	85,27	82,13	73,28	83,52	77,81	68,50	78,18	61,93	86,33	87,36

\* Analista: J. García Peña

más similares a los de andesitas-dacitas. En la Fig. 6 se han expresado gráficamente estas composiciones, constituyendo una serie continua de valores en las que no se observa interrupción.

Una serie única para las plagioclasas fue también establecida por Weaver et al. (1979) aunque los valores de los contenidos en An son algo inferiores a las aquí determinados.

Tabla 3

Plagioclasa de rocas volcánicas y enclaves plutónicos de Isla Decepción. Fórmula en base a 32 oxígenos.

Muestra	BASALTOS							
	6597	6595	6601	6598	6592	5443	5448	5441
SiO <sub>2</sub>	49,09	47,58	48,72	45,27	46,98	51,07	47,49	43,34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,89	33,59	32,73	35,34	34,26	29,10	34,42	35,95
CaO	15,19	17,33	16,72	17,23	17,93	15,49	17,93	20,02
Na <sub>2</sub> O	2,31	1,78	1,97	1,79	1,91	5,10	0,91	1,29
K <sub>2</sub> O	0,10	-	-	-	0,03	-	-	-
Total	99,59	100,34	100,16	99,64	101,14	100,79	100,77	100,62
Si	8,980	8,708	8,902	8,359	8,559	9,331	8,637	8,019
Al	7,128	7,281	7,083	7,731	7,394	6,298	7,415	7,879
Ca	2,977	3,399	3,273	3,409	3,500	3,033	3,494	3,968
Na	0,821	0,632	0,700	0,640	0,678	1,807	0,322	0,465
K	0,023	-	-	-	0,009	-	-	-
Ab	20,44	14,89	16,71	15,03	15,33	35,93	7,95	9,89
An	78,93	85,10	83,28	84,96	84,50	64,06	92,04	90,10
Or	0,61	-	-	-	0,16	-	-	-

\* Analista: J. García Peña

Tabla 3 (Continuación)

Muestra	ANDESITAS BASÁLTICAS														
	5438	5437	5436	5449	5450	5440	6602	6468	6588	6469	6469	6473	6596	6594	6599
SiO <sub>2</sub>	48,50	55,27	53,13	52,74	52,24	50,96	48,64	48,28	49,01	55,34	56,36	57,63	51,70	52,10	53,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,65	26,75	28,48	29,35	30,14	33,13	32,99	33,31	32,44	27,79	27,29	26,86	30,68	31,27	29,39
CaO	21,16	9,89	13,55	15,40	12,95	15,64	15,89	16,88	15,47	10,73	9,78	7,87	12,99	12,94	12,73
Na <sub>2</sub> O	1,98	7,02	4,14	3,86	4,44	1,77	2,20	1,46	3,18	5,22	6,41	6,88	4,31	4,27	4,58
K <sub>2</sub> O	-	0,63	0,17	-	-	-	0,04	0,09	0,03	0,09	0,18	0,24	0,10	0,10	-
Total	101,30	99,57	99,49	101,36	99,79	101,52	99,76	100,04	100,16	99,18	99,94	99,50	99,79	100,69	99,93
Si	8,918	10,068	9,700	9,502	9,500	9,111	8,905	8,827	8,957	10,036	10,137	10,359	9,409	9,389	9,649
Al	6,458	5,774	6,159	6,262	6,493	7,017	7,154	7,215	7,024	5,970	5,825	5,720	6,615	6,674	6,311
Ca	4,169	1,930	2,652	2,972	2,524	2,996	3,117	3,306	3,030	2,086	1,888	1,516	2,534	2,500	2,474
Na	0,708	2,480	1,466	1,348	1,566	0,615	0,780	0,518	1,128	1,836	2,242	2,398	1,522	1,494	1,613
K	-	0,147	0,040	-	-	-	0,009	0,023	0,009	0,021	0,042	0,056	0,023	0,023	-
Ab	13,74	52,93	33,91	29,93	36,87	16,16	19,03	12,77	25,89	45,55	52,22	58,97	35,90	35,77	11,80
An	86,25	43,76	65,11	70,06	63,12	83,83	80,72	86,67	73,93	53,90	46,75	39,59	63,50	63,63	88,19
Or	-	3,30	0,96	-	-	-	0,23	0,54	0,16	0,54	1,02	1,42	0,58	0,58	-

Tabla 3 (Continuación)

Muestra	ANDESITAS					DACITAS		GABROS	TRONDHJEMITAS	TONALITAS
	6590	6591	6589	6471	6467	6472	6445	6444	5439	6470
SiO <sub>2</sub>	52,51	56,63	56,49	55,93	54,71	62,00	62,44	47,62	60,13	58,70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,31	26,71	28,04	28,00	28,31	24,00	23,20	33,91	23,81	25,13
CaO	14,65	8,22	9,82	11,00	10,81	5,93	4,89	17,62	6,73	7,51
Na <sub>2</sub> O	3,06	7,45	5,97	5,59	5,47	7,90	8,84	1,44	7,29	8,05
K <sub>2</sub> O	0,05	0,09	0,06	0,14	0,10	0,47	0,51	-	0,25	0,33
Total	100,64	99,12	100,40	100,68	99,41	100,32	99,90	100,60	98,23	99,74
Si	9,476	10,261	10,103	10,016	9,923	10,976	11,097	8,684	10,880	10,558
Al	6,479	5,734	5,941	5,939	6,083	5,032	4,884	7,324	5,105	5,354
Ca	2,834	1,597	1,881	2,112	2,100	1,126	0,932	3,443	1,305	1,448
Na	1,071	2,618	2,072	1,943	1,923	2,711	3,049	0,509	2,560	2,808
K	0,011	0,021	0,013	0,033	0,023	0,107	0,117	-	0,059	0,076
Ab	26,17	60,39	51,70	46,03	46,03	67,48	71,87	12,22	63,87	63,45
An	73,53	39,09	48,94	53,16	53,37	29,71	25,02	87,77	34,59	34,73
Or	0,29	0,50	0,35	0,79	0,58	2,79	3,10	-	1,52	1,80

## Anfibol y biotita

Solamente han aparecido en enclaves plutónicos como gabros, trondhjemitas y tonalitas (Tabla 4). La biotita sólo en tonalitas. Según la nomenclatura de Hawthorne (1983) para anfíboles se clasifican como hornblendas tschermaquíticas los procedentes de gabros y tonalitas y como hornblenda magnética los de trondhjemitas.

## Opacos

Son escasos los individuos analizados pero presentan composiciones de magnetita fundamentalmente, tanto en andesitas basálticas como en andesitas y dacitas, con fluctuaciones en sus contenidos de FeO-TiO<sub>2</sub> que la hacen cambiar composicionalmente a magnetita titanífera (Tabla 5).

**Tabla 4**  
Anfiboles y biotitas de enclaves plutónicos de Isla Decepción.  
Fórmula en base a 24 oxígenos.

Muestra	ANFIBOL			BIOTITA
	GABROS	TRONDHJEMITAS	TONALITAS	TONALITAS
	5442	5439	6470	6470
SiO <sub>2</sub>	43,70	48,22	46,72	36,52
TiO <sub>2</sub>	2,59	0,96	1,34	2,37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,26	2,12	9,88	14,60
FeO	9,54	19,32	13,25	19,26
MnO	0,25	-	0,26	0,56
MgO	12,47	14,12	13,62	12,46
CaO	21,39	8,08	11,31	-
Na <sub>2</sub> O	0,84	2,88	1,10	-
K <sub>2</sub> O	0,04	0,57	0,64	10,00
H <sub>2</sub> O	1,99	1,96	-	-
Total	99,12	98,27	98,16	95,77
Si	6,571	7,359	6,793	5,581
Al <sup>IV</sup>	1,116	0,384	1,207	2,419
Al <sup>VI</sup>	-	-	0,496	0,223
Ti	0,293	0,110	0,147	0,272
Fe	1,200	2,467	1,611	2,461
Mn	0,031	-	0,033	0,073
Mg	2,795	3,212	2,952	2,838
Ca	3,446	1,322	1,762	-
Na	0,247	0,853	0,310	-
K	0,009	0,112	0,120	1,950

\* Analista: J. García Peña

Los enclaves de trondhjemitas y tonalitas contienen también magnetita siendo titanífera la correspondiente a la trondhjemita. La magnetita no titanífera está sólo presente en tonalitas.

En andesitas basálticas se analizó también un ejemplar de ilmenita.

#### Quimismo litológico y evolución

Se han analizado muestras correspondientes a

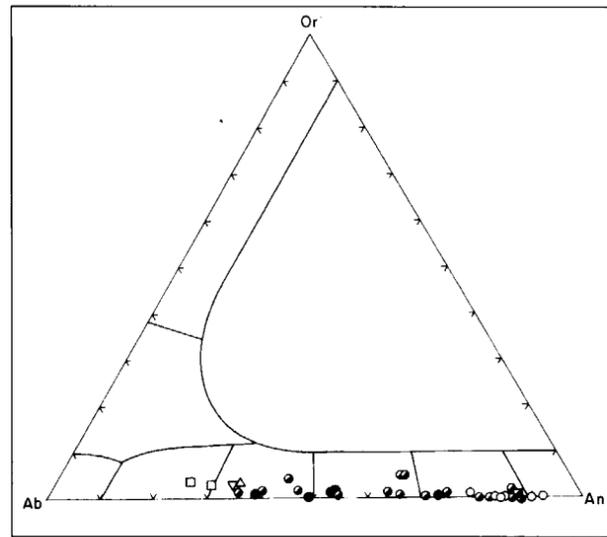


Fig. 6.- Triángulo Or-Ab-An para feldespatos, con la proyección del componente plagioclásico de la serie volcánica de I.D.

basaltos, basaltos andesíticos, andesitas y dacitas del conjunto volcánico y a gabros, trondhjemitas y tonalitas del conjunto de enclaves plutónicos.

En la tabla 6 se han representado los datos analíticos (elementos mayores y menores), norma CIPW y clasificación de las rocas junto a la situación de las muestras, teniendo en cuenta, que dado el solapamiento de volcanes, en el caso de líticos y bombas, resulta en ocasiones difícil precisar su procedencia.

En conjunto constituyen un grupo de rocas de tendencias calcoalcalina y toleítica (Fig. 7) con

**Tabla 5**  
Minerales opacos de rocas volcánicas y enclaves plutónicos de Isla Decepción.

Muestra	ANDESITAS BASÁLTICAS		ANDESITA	DACITA		GABROS	TRONDHJEMITAS	TONALITAS
	5436	5440	6471	6445	6472	5442	5439	6470
SiO <sub>2</sub>	-	-	0,48	0,20	0,17	-	-	0,12
TiO <sub>2</sub>	11,92	48,81	23,64	24,66	17,08	13,53	12,44	0,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,13	-	1,41	0,74	1,94	29,36	-	0,48
FeO	88,88	48,69	71,54	70,85	74,70	30,09	88,84	92,70
MnO	1,13	-	0,47	0,18	0,93	-	-	0,14
MgO	-	3,165	0,83	2,24	1,34	13,76	1,21	-
CaO	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	103,08	100,67	98,40	98,89	96,18	86,74	102,50	93,58

**Tabla 6**

Muestra	BASALTOS														
	5448	5440	5441	5443	6592J	6595	6597	6598	6601	6717	7355	7364	7364A	7379	7514
SiO <sub>2</sub>	47,00	48,00	49,50	51,20	49,02	52,00	51,00	50,30	51,00	47,58	51,25	49,55	49,92	51,75	51,50
TiO <sub>2</sub>	0,31	1,21	0,77	1,20	0,88	1,33	1,27	1,47	1,53	0,82	1,50	1,24	1,14	1,43	1,47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,62	19,48	18,10	17,53	21,30	17,10	17,97	17,68	17,68	21,07	15,16	16,05	15,16	15,91	14,98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,98	3,70	0,70	2,48	2,19	3,93	2,13	3,63	2,82	1,51	4,84	3,91	4,79	-	5,95
FeO	3,01	3,58	5,65	5,55	4,08	4,92	6,73	5,15	5,92	4,14	2,52	2,63	1,70	7,50	2,87
MnO	0,06	0,13	0,10	0,13	0,11	0,15	0,15	0,15	0,15	0,10	0,15	0,10	0,09	0,13	0,14
MgO	4,50	6,12	12,31	6,72	6,01	6,22	6,34	6,48	6,52	5,96	4,46	5,35	5,31	3,35	4,18
CaO	14,44	11,85	10,37	9,80	12,49	9,71	9,87	10,07	9,87	14,09	6,41	8,60	7,66	6,85	6,44
Na <sub>2</sub> O	2,78	3,32	2,17	3,43	2,65	3,77	3,65	4,28	3,75	2,99	4,63	2,61	2,50	4,61	5,37
K <sub>2</sub> O	0,15	0,21	0,10	0,13	0,14	0,30	0,39	0,27	0,33	0,23	0,55	0,42	0,39	0,45	0,40
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,20	0,04	0,15	0,13	0,09	0,25	0,24	0,25	0,14	0,27	0,17	0,15	0,26	0,27
H <sub>2</sub> O	0,00	1,98	-	1,18	0,61	0,08	-	-	-	1,03	8,21	8,68	10,62	7,67	6,01
Total	99,87	99,78	99,81	99,50	99,61	99,60	99,75	99,72	99,82	99,66	99,95	99,31	99,63	99,91	99,58
V	83	182	133	242	126	246	240	225	234	129	232	134	182	197	231
Rb	-	21	19	6	-	-	14	7	-	-	19	13	-	-	13
Ba	37	145	57	86	27	63	70	58	66	25	94	52	92	118	142
Pb	-	-	-	-	-	69	-	-	-	-	-	-	-	-	8
Sr	584	712	405	401	428	417	410	421	411	430	328	359	331	322	-
La	-	18	2	5	5	9	8	9	9	5	13	8	9	14	17
Ce	8	49	8	19	6	22	17	22	22	5	28	14	22	32	30
Y	4	7	5	6	20	22	17	20	18	19	41	27	23	33	29
Th	-	-	-	-	5	5	9	5	5	5	1	-	4	-	6
Cu	45	108	91	92	49	58	35	34	29	73	61	81	84	59	53
Co	17	24	41	28	39	47	56	45	53	24	39	35	36	26	27
Ni	57	63	538	86	59	43	22	25	21	59	16	60	67	17	14
Cr	214	104	540	114	154	108	105	110	104	175	36	85	151	53	46
Zr	93	165	96	131	84	116	122	114	121	83	192	135	127	224	191
Nb	-	-	-	-	5	5	5	5	5	5	5	2	2	4	2
Nd	-	-	-	-	6	18	15	14	16	7	26	14	16	23	22
AN	79,44	57,26	68,19	52,48	67,14	47,49	50,49	44,05	48,96	70,69	32,61	58,27	57,82	35,42	25,55
Q	-	-	-	0,61	-	1,38	-	-	-	-	4,98	9,15	11,42	1,32	2,62
Or	0,89	1,24	0,59	0,77	0,83	1,77	2,30	1,60	1,95	1,36	3,25	2,48	2,30	2,66	2,36
Ab	15,46	28,09	18,36	29,02	22,42	31,90	30,89	35,85	31,73	17,99	39,18	22,09	21,15	39,01	45,44
An	59,72	37,63	39,35	32,05	45,31	28,85	31,50	28,23	30,44	43,39	18,96	30,84	28,99	21,39	15,59
Ne	4,37	-	-	-	-	-	-	0,20	-	3,96	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DI	9,48	15,63	9,45	12,53	12,23	14,92	12,86	16,08	13,59	20,53	8,62	8,34	6,25	9,12	11,36
Hy	-	0,81	15,90	17,11	10,02	12,26	10,29	-	10,78	-	7,11	9,46	10,82	15,43	5,14
Wo	-	-	13,59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ol	7,90	6,26	1,01	-	2,54	-	5,83	9,15	3,76	7,32	-	-	-	-	-
Mt	1,42	5,36	1,46	3,60	3,18	5,70	3,09	5,26	4,09	2,19	4,26	5,21	2,47	-	5,45
Il	0,59	2,30	-	2,28	1,67	2,53	2,41	2,79	2,91	1,56	2,85	2,36	2,17	2,72	2,79
Hem	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,90	0,32	3,09	-	2,19
Ap	0,05	0,46	0,09	0,35	0,30	0,21	0,58	0,56	0,58	0,32	0,63	0,39	0,35	0,60	0,63
Suma	99,87	97,30	99,81	98,32	99,00	99,52	99,75	99,72	99,82	98,63	97,74	90,63	89,01	92,24	93,57
I.D.	20,71	29,33	18,95	30,40	23,25	35,05	33,19	37,65	33,68	23,31	47,41	33,72	34,87	42,99	50,42

Tabla 6 (Continuación)

Muestra	ANDESITAS BASALTICAS														
	7517	7643	5435	5436	5437	5438	5449	5450	6594	6596	6599	6600	6602	6468	6469
SiO <sub>2</sub>	52,00	55,60	54,60	54,00	55,60	54,36	52,50	55,60	53,10	52,65	54,00	53,00	56,40	55,38	53,20
TiO <sub>2</sub>	1,21	1,92	1,84	1,52	1,83	2,20	1,53	1,53	1,88	2,06	2,64	1,57	1,92	0,97	1,99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,41	14,43	16,83	16,41	16,66	15,76	20,57	16,87	16,06	15,93	15,40	17,50	15,92	17,62	14,66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,69	7,34	2,31	2,96	2,68	4,09	2,74	5,79	1,83	2,94	2,57	2,25	1,23	1,34	3,04
FeO	6,16	3,45	6,42	5,60	6,02	5,86	4,98	3,02	8,26	8,18	8,69	6,26	7,93	5,28	8,98
MnO	0,11	0,17	0,17	0,15	0,16	0,18	0,08	0,15	0,18	0,20	0,20	0,15	0,16	0,13	0,20
MgO	4,96	3,23	4,06	5,51	3,98	3,55	3,36	3,58	4,59	4,37	3,73	5,43	3,70	4,51	4,04
CaO	10,46	8,38	8,09	9,71	7,84	7,81	8,55	7,37	8,71	8,48	6,87	8,37	6,66	9,95	7,65
Na <sub>2</sub> O	3,07	3,71	4,73	3,63	4,63	4,93	4,72	4,87	4,61	4,54	4,90	4,23	4,66	3,77	4,91
K <sub>2</sub> O	0,23	0,51	0,31	0,20	0,34	0,66	0,17	0,43	0,38	0,32	0,56	0,42	0,63	0,46	0,44
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,23	0,27	0,24	0,19	0,25	0,36	0,26	0,30	0,29	0,33	0,41	0,24	0,32	0,17	0,38
H <sub>2</sub> O	1,17	0,92	-	-	-	-	0,20	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	99,70	99,03	99,60	99,88	99,99	99,76	99,66	99,51	99,89	100,00	99,97	99,42	99,53	99,58	99,49
V	222	273	279	238	269	282	271	266	321	329	296	230	296	179	394
Rb	11	12	-	-	23	12	21	1	11	9	-	17	14	2	10
Ba	136	71	130	122	125	1234	123	149	63	66	80	63	118	91	85
Pb	-	5	10	-	-	-	-	-	-	17	15	5	5	-	-
Sr	437	417	332	322	330	335	416	339	295	270	268	378	336	379	236
La	12	10	10	10	12	15	11	9	8	8	12	10	13	5	10
Ce	18	28	28	31	34	37	30	35	17	20	33	23	33	12	28
Y	17	31	12	12	13	14	10	11	23	25	23	21	22	20	22
Th	1	1	-	5	1	-	4	1	5	7	5	7	5	13	7
Cu	56	23	33	42	80	113	27	49	51	25	23	56	76	66	51
Co	28	33	26	25	24	22	24	22	55	49	52	52	47	21	27
Ni	48	4	12	51	10	12	24	10	7	5	5	17	8	32	5
Cr	146	28	6	152	6	13	34	9	43	23	5	93	23	81	26
Zr	139	192	240	201	256	262	221	273	127	138	167	122	176	114	143
Nb	3	5	-	-	-	-	-	-	5	5	5	5	6	-	-
Nd	16	16	-	-	-	-	-	-	19	25	32	19	29	10	27
AN	57,93	40,33	37,27	47,59	37,67	31,21	46,30	35,72	36,07	36,57	30,71	43,47	34,38	48,30	28,63
Q	3,56	14,07	3,12	5,19	5,49	4,06	1,10	7,87	-	0,75	2,56	0,78	5,36	4,82	0,64
Or	1,36	3,01	1,83	1,18	2,01	3,90	1,00	2,54	2,25	1,89	3,31	2,48	3,72	2,72	2,60
Ab	25,98	31,39	42,02	30,72	39,18	41,72	39,94	41,21	39,01	38,42	41,46	35,79	39,43	31,90	41,55
An	35,78	21,22	23,78	27,89	23,67	18,93	34,44	22,90	22,01	22,14	18,37	27,52	20,66	29,80	16,66
Ne	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Di	11,93	14,47	12,10	15,33	11,07	14,11	5,09	9,11	15,95	14,64	10,80	10,09	8,55	15,05	15,61
Hy	14,65	1,33	11,34	11,95	10,63	6,11	10,40	4,69	11,99	13,23	13,77	15,95	15,63	11,11	13,37
Wo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,80	-	-	-	-	-
Mt	2,45	6,11	3,35	4,29	3,89	5,93	3,97	5,79	2,65	4,26	3,73	3,26	1,78	1,94	4,41
Il	2,30	3,65	3,49	2,89	3,48	4,18	2,91	2,91	3,57	3,91	5,01	2,98	3,65	1,84	3,78
Hem	-	3,13	-	-	-	-	-	1,80	-	-	-	-	-	-	-
Ap	0,53	0,63	0,56	0,44	0,58	0,83	0,60	0,70	0,67	0,76	0,95	0,56	0,74	0,39	0,88
Suma	98,53	99,01	99,60	99,88	99,99	99,76	99,46	99,51	99,89	100,00	99,97	99,42	99,53	99,58	99,49
I.D.	30,90	48,48	44,98	37,09	46,68	49,68	42,05	51,62	41,25	41,05	47,33	39,06	48,51	39,44	44,78

Tabla 6 (Continuación)

Muestra	ANDESITAS BASALTICAS											ANDESITAS			
	6473	6588A	7357	7364B	7365	7376	7377	7360	7361	V-2	7516	7642	6467	6471A	6471B
SiO <sub>2</sub>	54,94	54,50	55,81	53,70	53,21	53,20	56,00	52,75	53,63	54,80	55,30	57,00	58,84	57,21	57,70
TiO <sub>2</sub>	1,58	1,66	1,51	1,18	1,49	1,29	2,64	1,33	1,33	1,26	1,63	1,99	1,50	1,29	1,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,37	16,37	15,91	17,05	16,68	17,62	12,98	17,99	18,20	15,49	15,94	15,16	15,23	15,84	13,71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,77	2,49	1,21	2,16	1,26	2,47	2,83	2,69	2,18	3,29	2,45	2,16	0,43	1,54	2,99
FeO	8,68	6,49	6,71	4,31	6,47	3,99	7,27	4,38	5,04	5,27	6,98	7,15	8,17	7,02	7,87
MnO	0,21	0,16	0,15	0,11	0,14	0,10	0,19	0,14	0,14	0,13	0,14	0,16	0,19	0,16	0,19
MgO	3,50	4,76	4,79	5,14	6,11	5,32	3,80	5,18	4,65	3,57	4,53	3,48	2,33	3,75	2,59
CaO	7,21	8,04	8,86	9,84	10,01	10,27	6,87	9,95	9,94	7,47	8,01	7,17	5,92	6,85	5,91
Na <sub>2</sub> O	5,22	4,71	4,00	3,06	3,62	3,17	3,79	3,17	2,83	4,63	4,06	4,43	5,96	4,90	5,39
K <sub>2</sub> O	0,53	0,48	0,35	0,23	0,21	0,12	0,54	0,29	0,38	0,50	0,28	0,72	0,85	0,69	1,06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,42	0,26	0,30	0,25	0,30	0,32	0,54	0,24	0,23	0,26	0,29	0,31	0,47	0,29	0,50
H <sub>2</sub> O	-	-	-	2,93	-	1,63	2,46	1,26	1,41	2,99	0,21	-	-	-	-
Total	99,43	99,92	99,60	99,96	99,50	99,50	99,91	99,37	99,96	99,66	99,82	99,73	99,89	99,54	99,35
V	333	254	277	260	245	240	456	243	233	-	268	305	178	254	292
Rb	12	14	13	-	-	-	-	13	-	-	12	13	16	26	20
Ba	92	91	89	84	68	77	184	81	83	-	132	112	166	129	198
Pb	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	11	27	24	5
Sr	218	355	362	411	395	433	304	438	438	-	372	397	249	309	213
La	11	10	9	11	10	10	21	9	11	-	14	11	18	13	22
Ce	32	22	26	25	22	19	52	24	22	-	20	30	50	32	60
Y	22	23	33	29	32	29	48	24	31	-	27	35	25	20	26
Th	5	8	-	6	-	5	6	1	1	-	3	2	-	10	6
Cu	22	54	66	62	35	62	155	62	60	-	59	85	11	60	99
Co	25	52	64	32	68	49	33	81	33	-	31	31	17	24	18
Ni	5	13	12	55	30	58	10	57	59	-	11	1	5	7	5
Cr	33	30	40	168	126	131	26	140	150	-	48	23	13	27	24
Zr	172	145	166	134	156	131	262	135	135	-	174	239	264	185	290
Nb	-	5	3	4	3	3	8	4	4	-	2	6	-	-	-
Nd	27	21	23	18	18	18	32	19	19	-	20	23	38	26	41
AN	24,35	35,68	41,92	55,35	48,32	55,53	34,39	55,90	59,94	33,81	41,57	34,05	19,60	31,64	18,11
Q	1,92	1,77	5,57	8,24	1,82	7,06	12,80	6,04	8,20	6,34	6,60	8,06	3,41	4,95	6,09
Or	3,13	2,84	2,07	1,36	1,24	0,71	3,19	1,71	2,25	2,95	1,65	4,26	5,02	4,08	6,26
Ab	44,17	39,86	33,85	25,89	30,63	26,82	32,07	26,82	23,95	39,18	34,35	37,49	50,43	41,46	45,61
An	14,22	22,11	24,43	32,11	28,65	33,50	16,81	34,00	35,84	20,01	24,44	19,36	12,30	19,19	10,09
Ne	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Di	15,71	13,10	14,41	12,09	15,49	12,24	11,26	11,03	9,68	12,48	10,98	11,73	11,89	10,69	13,41
Hy	12,29	12,88	13,96	11,39	16,33	10,77	10,95	11,52	12,42	7,94	14,26	11,22	12,29	13,82	9,67
Wo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mt	4,02	3,61	1,75	3,13	1,83	3,58	4,10	3,90	3,16	4,77	3,55	3,13	0,62	2,23	4,34
Il	3,00	3,15	2,87	2,24	2,83	2,45	5,01	2,53	2,53	2,39	3,10	3,78	2,85	2,45	2,73
Hem	-	-	-												

Tabla 6 (Continuación)

	ANDESITAS					DACÍTAS									
	6589B	6590H	65911	7369	7372	5444	5445	5446	6718	5447	6445	6472	7371	7370	7367
SiO <sub>2</sub>	61,70	58,30	63,00	59,78	61,60	69,00	67,11	68,50	69,00	68,67	66,80	68,03	67,67	70,90	69,44
TiO <sub>2</sub>	1,26	1,23	1,03	1,88	1,65	0,65	0,50	0,63	0,55	0,80	0,51	0,51	0,80	0,70	0,56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,85	16,70	15,60	15,57	15,25	14,81	14,27	15,10	15,15	15,13	14,67	14,46	14,66	14,34	14,87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,46	2,68	2,16	1,13	1,09	0,20	0,64	0,65	0,07	0,29	3,31	0,81	-	-	0,63
FeO	5,79	5,84	4,67	6,48	5,74	3,51	3,12	3,25	3,61	3,62	2,14	3,48	4,22	3,59	3,23
MnO	0,18	0,15	0,18	0,15	0,18	0,11	0,12	0,11	0,14	0,12	0,06	0,16	0,12	0,10	0,14
MgO	1,82	3,14	1,15	2,35	1,84	0,63	0,57	0,64	0,55	0,62	0,49	0,70	0,51	0,35	0,61
CaO	4,57	7,15	3,75	6,07	6,34	2,07	1,82	2,11	2,06	2,18	2,09	2,28	2,49	1,74	1,93
Na <sub>2</sub> O	5,89	2,15	6,23	5,04	5,00	6,71	6,55	6,54	6,74	6,48	7,88	7,03	5,97	6,05	6,33
K <sub>2</sub> O	1,03	0,29	1,27	0,70	0,67	1,73	1,84	1,65	1,88	1,71	1,32	1,90	1,78	1,79	1,87
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,42	0,19	0,35	0,41	0,55	0,11	0,08	0,14	0,17	0,09	0,11	0,14	0,16	0,19	0,15
H <sub>2</sub> O	-	1,74	0,59	-	0,03	0,21	3,21	0,28	-	0,28	0,48	-	1,49	-	-
Total	99,97	99,56	99,98	99,56	99,94	99,74	99,83	99,60	99,92	99,99	99,86	99,50	99,97	99,75	99,76
V	71	237	41	230	162	6	13	8	5	4	15	12	40	17	16
Rb	21	6	30	27	23	36	19	35	53	28	19	43	31	40	35
Ba	203	47	232	154	178	307	290	301	294	305	282	296	262	276	270
Pb	7	-	50	-	-	-	12	21	-	9	9	49	-	-	-
Sr	311	398	275	307	304	206	167	211	186	195	155	135	140	126	138
La	23	7	26	17	9	28	31	27	26	26	16	27	27	27	28
Ce	52	12	72	46	51	71	82	65	70	71	48	71	75	69	69
Y	33	21	35	46	55	26	28	25	38	26	28	32	69	64	60
Th	5	5	5	-	5	8	5	21	7	1	5	-	8	3	4
Cu	24	56	25	57	24	18	49	40	4	17	12	5	9	6	6
Co	36	47	42	51	55	3	5	4	2	5	5	5	31	38	32
Ni	5	73	5	-	-	4	3	6	5	2	5	5	-	-	-
Cr	5	93	5	2	1	9	-	-	-	-	13	13	-	-	-
Zr	324	99	387	268	283	610	711	607	518	113	504	530	493	518	509
Nb	5	5	5	7	8	14	14	-	5	10	-	-	12	14	15
Nd	38	10	44	26	37	-	-	-	43	-	29	40	39	35	41
AN	21,65	65,30	17,07	29,44	28,89	8,37	6,89	11,19	8,84	11,53	1,13	3,71	13,59	11,55	11,03
Q	10,01	22,14	11,85	10,81	14,18	16,76	16,30	17,53	15,92	17,34	12,72	13,72	18,18	22,73	19,10
Or	6,09	1,71	7,51	4,14	3,96	10,22	10,87	9,75	11,11	10,11	7,80	11,23	10,52	10,58	11,05
Ab	49,84	18,19	52,72	42,65	42,31	56,78	55,42	55,34	57,03	54,83	66,68	59,49	50,52	51,19	53,56
An	13,77	34,23	10,85	17,80	17,19	5,18	4,10	6,97	5,53	7,15	0,76	2,29	7,95	6,69	6,64
Ne	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	-	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Di	5,19	-	4,62	8,07	8,97	3,76	3,78	2,21	3,09	2,65	3,51	6,95	2,92	0,61	1,68
Hy	9,60	14,58	5,95	9,95	7,32	5,05	4,07	5,06	5,69	5,49	-	3,36	6,40	6,17	5,40
Wo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,89	-	-	-	-
Ol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mt	2,12	3,89	3,13	1,64	1,58	0,29	0,93	0,94	0,10	0,42	4,80	1,17	-	-	0,91
Il	2,39	2,34	1,96	3,57	3,13	1,23	0,95	1,20	1,04	1,52	0,97	0,97	1,52	1,33	1,06
Hem	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ap	0,97	0,44	0,81	0,95	1,27	0,25	0,19	0,32	0,39	0,21	0,25	0,32	0,37	0,44	0,35
Suma	99,97	97,82	99,39	99,56	99,91	99,53	96,62	99,32	99,92	99,71	99,38	99,50	98,38	99,75	99,76
I.D	65,94	42,05	72,07	57,59	60,45	83,76	82,60	82,62	84,06	82,28	87,20	84,44	79,22	84,51	83,72

Tabla 6 (Continuación)

	GABROS			TRONDHEMITAS	TONALITAS
	5442	6444	7515	5439	6470
SiO <sub>2</sub>	45,60	50,27	47,70	68,00	64,80
TiO <sub>2</sub>	0,38	0,38	0,20	0,64	0,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,82	23,00	24,33	15,63	15,87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,14	0,97	1,84	1,90	2,03
FeO	3,22	3,87	3,61	2,04	2,62
MnO	0,06	0,09	0,08	0,12	0,10
MgO	5,96	5,91	6,56	0,86	2,13
CaO	13,78	12,82	13,45	2,33	5,33
Na <sub>2</sub> O	3,51	2,08	1,82	6,40	4,10
K <sub>2</sub> O	0,05	0,18	0,02	1,53	1,80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,03	0,07	0,14	0,09
H <sub>2</sub> O	0,07	-	0,09	0,27	0,37
Total	99,61	99,60	99,77	99,86	99,69
V	74	65	64	63	132
Rb	-	11	-	30	52
Ba	37	34	56	256	465
Pb	-	-	-	1	-
Sr	559	530	533	219	501
La	-	5	7	24	10
Ce	7	5	12	66	13
Y	5	17	8	25	18
Th	-	-	3	7	-
Cu	97	45	14	56	56
Co	18	24	28	5	15
Ni	46	116	74	5	8
Cr	277	235	246	7	18
Zr	84	95	69	608	202
Nb	-	-	-	11	-
Nd	-	5	8	-	15
AN	82,92	75,03	79,06	14,79	36,08
Q	-	0,89	-	18,69	19,90
Or	0,30	1,06	0,12	9,04	10,64
Ab	11,24	17,60	15,40	54,16	34,69
An	54,55	52,89	58,16	9,40	19,58
Ne	10,00	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-
Di	10,94	8,46	6,48	1,01	5,07
Hy	-	16,49	11,59	2,99	5,43
Wo	-	-	-	-	-
Ol	10,09	-	4,72	-	-
Mt	1,65	1,41	2,67	2,75	2,94
Il	0,72	0,72	0,38	1,22	0,85
Hem	-	-	-	-	-
Ap	0,05	0,07	0,16	0,32	0,21
Suma	99,54	99,60	99,68	99,59	99,32
I.D	21,54	19,56	15,52	81,89	65,23

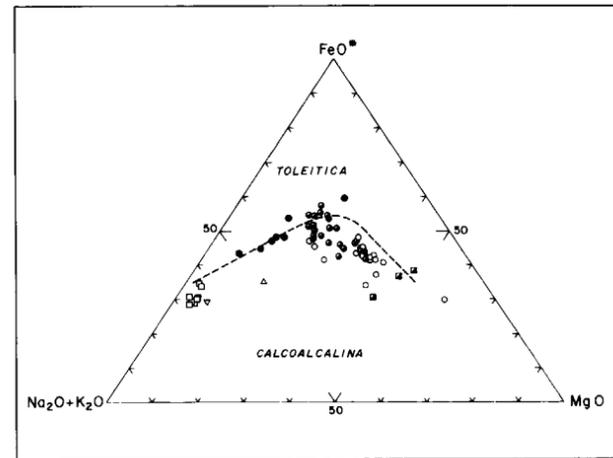


Fig. 7.- Diagrama AFM presentando la variación toleítica-calcoalcalina de los materiales volcánicos de I.D. y el enriquecimiento en Fe de los términos basálticos.

altos contenidos en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y bajo  $\text{TiO}_2$  y  $\text{K}_2\text{O}$  apreciándose un cierto enriquecimiento en Fe en algunos de los términos basálticos. En la Fig. 8 se puede observar la variación de algunos elementos en función del contenido en  $\text{SiO}_2$ . En elementos como FeO, MnO,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ , V se observa una inflexión en su tendencia a partir de la composición andesítica, probablemente en relación con la fuerte cristalización de magnetita-ilmenita en los términos más básicos aunque no se descarta que dentro del espectro de rocas más básicas se encuentren rocas pertenecientes a distintas series evolutivas.

La evolución de la norma CIPW se traduce en pérdida de olivino y nefelina simultáneamente con la entrada de cuarzo, anortita, hyperstena, y diopsido disminuyen progresivamente hacia las dacitas. Examinando las composiciones normativas se aprecia que en los términos basálticos se encuentran tipos que fluctúan desde subsaturados con Ne normativa a otros con un apreciable grado de saturación en Q lo que parece apoyar la coexistencia de magmas basálticos asociados a diferentes secuencias genéticas.

El diagrama álcalis- $\text{SiO}_2$  (Irvine y Baragar 1971) (Fig. 9) separa nitidamente el tipo toleítico del calcoalcalino al igual que el diagrama  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  (Fig. 10), en donde, en términos generales, predominan toleitas de bajo K encontrando también rocas

calcoalcalinas de medio y bajo K (escasas). Este carácter calcoalcalino de la serie se marca igualmente en la proyección del triángulo  $\text{Ti}/100\text{-Zr-Sr}/2$  de Pearce y Cann (1973) (Fig. 11). No obstante hay que tener en cuenta que según estos criterios de discriminación, las rocas basálticas alcalinas de la isla James Ross quedan también incluidas en el campo de los basaltos calcoalcalinos (F. Bellido comunicación personal).

El carácter orogénico de estas vulcanitas queda patente en los diagramas  $\text{FeO}^* \text{-FeO}^*/\text{MgO}$  y  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 \text{-FeO}/\text{Mg}$  y  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 \text{-FeO}/\text{MgO}$  (Fig. 12) de Albarede (1992) según los límites marcados por este autor para los términos basálticos.

El triángulo  $\text{FeO}^* \text{-MgO-}\text{Al}_2\text{O}_3$  (Pearce et al. 1977) (Fig. 13) clasifica igualmente como orogénica la serie volcánica de I.D. El mismo carácter orogénico se observa en el triángulo  $\text{Ti}/100\text{-Y}^*3\text{-Zr}$  (Pearce y Cann 1973) (Fig. 14), aunque es apreciable que los términos basálticos se reparten entre los dominios intraplaca y calcoalcalino lo que nuevamente pone de manifiesto la posible presencia de magmas basálticos asociados a distintos estadios de la evolución geodinámica de la isla, y más probablemente, teniendo en cuenta las observaciones anteriores, la existencia de materiales volcánicos pertenecientes a distintas series.

Una gran similitud se encuentra en el quimismo de los enclaves de rocas plutónicas encontradas con las rocas volcánicas.

Los gabros analizados presentan valores de elementos mayores y menores análogos a los de algunos basaltos e igualmente ocurre para trondhjemitas y dacitas. En la tonalita se observan pequeñas desviaciones del componente dacítico. Se pueden considerar estos enclaves como agregados cristalinos formados en la propia cámara magmática (Baker et al. 1975), (Risso et al. 1990).

Baker et al. (1975) proponen como magma original una roca basáltica con  $\text{SiO}_2$  comprendido entre 48-49% y 10-15% de olivino normativo. Algunas muestras de gablo presentan un quimismo y  $N^\circ$  de Mg similares aunque los contenidos en Cr y Ni sean algo más bajos. A partir de

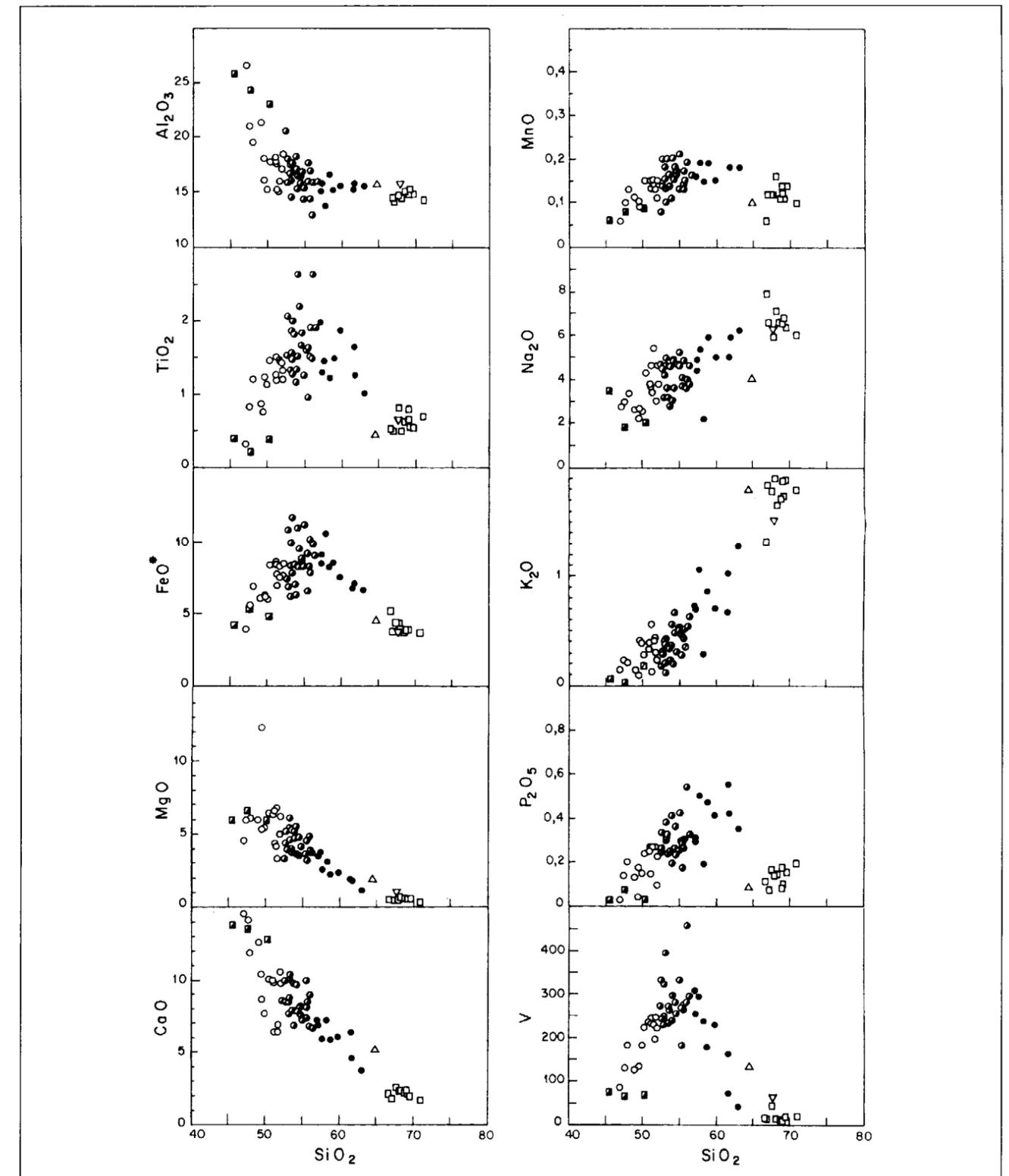


Fig. 8.- Relaciones  $\text{SiO}_2$  elementos para rocas volcánicas y enclaves plutónicos.

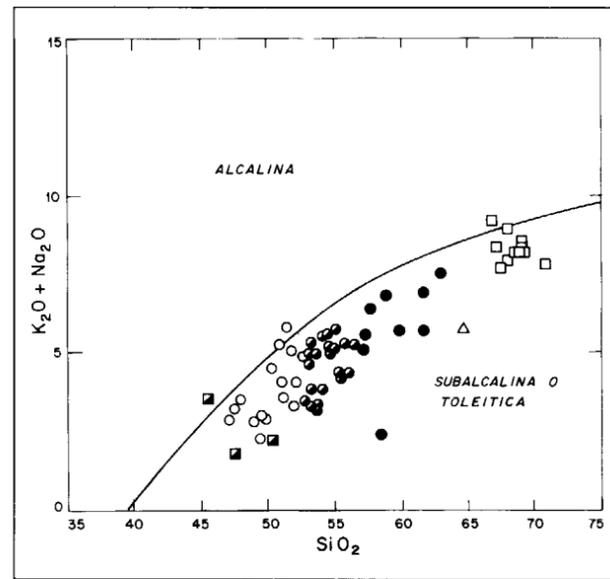


Fig. 9.- Diagrama álcalis-SiO<sub>2</sub> (Irvine y Baragar 1971) con la separación entre las series toleítica-subalcalina y alcalina.

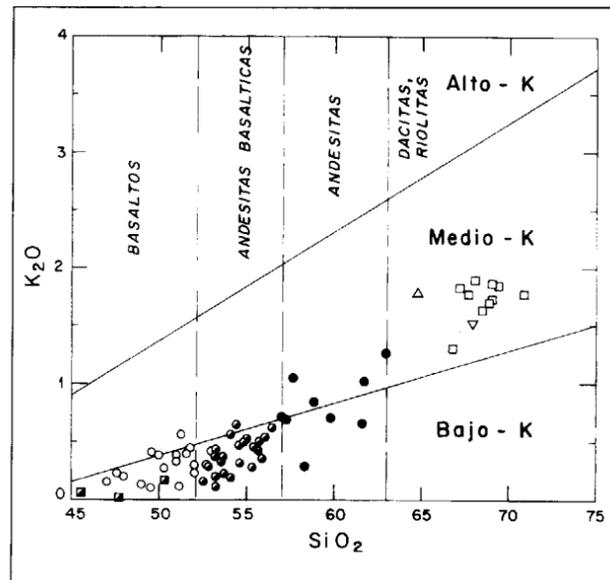


Fig. 10.- Diagrama SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O (TAS) con la separación de los campos de bajo, medio y alto K.

esta roca consiguen buenas correlaciones en los modelos hasta alcanzar las composiciones dacíticas. El modelo elaborado indica un proceso mixto de asimilación (posiblemente de corteza oceánica) y fraccionación en el paso andesita-dacita. Un proceso de fraccionación es también sugerido por Yanagi y Yamashita (1994) para

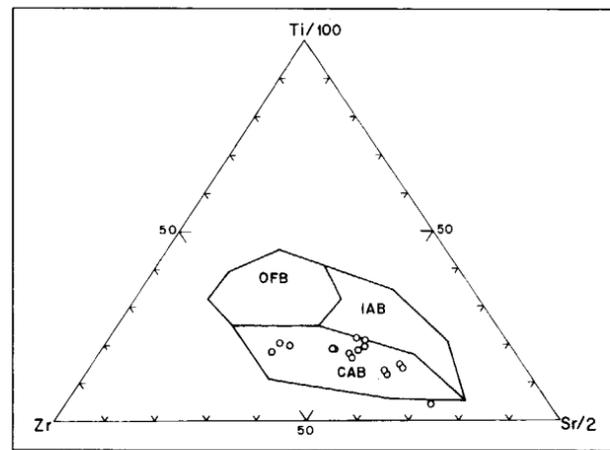


Fig. 11.- Triángulo Zr-Ti/100-Sr/2 (Pearce y Cann 1973) con la proyección en el campo calcoalcalino (CAB) de los basaltos de I.D.

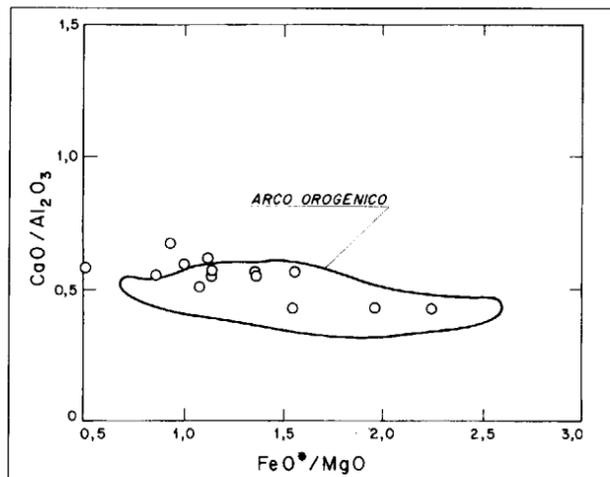
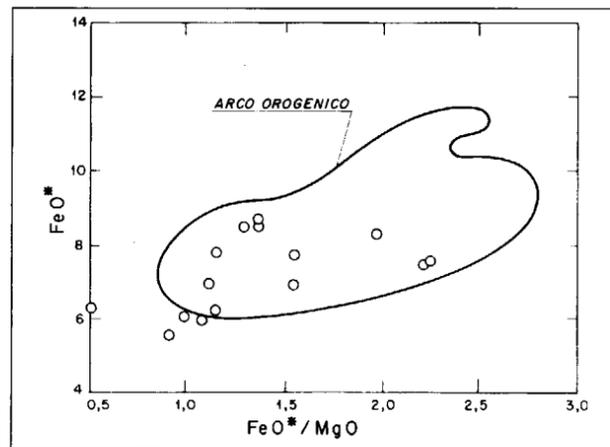


Fig. 12.- Diagramas FeO\*/MgO-FeO\* (a) y FeO/MgO-CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b) de Albarede (1992) con la delimitación del campo orogénico.

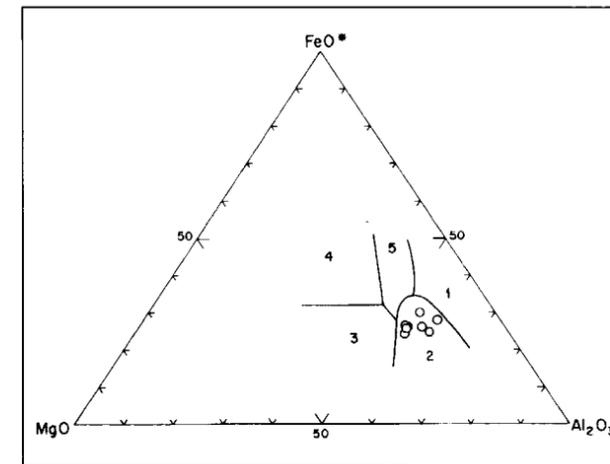


Fig. 13.- Triángulo FeO\*-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de Pearce et al. (1977) para muestras con SiO<sub>2</sub> 51-56% delimitando el campo orogénico.

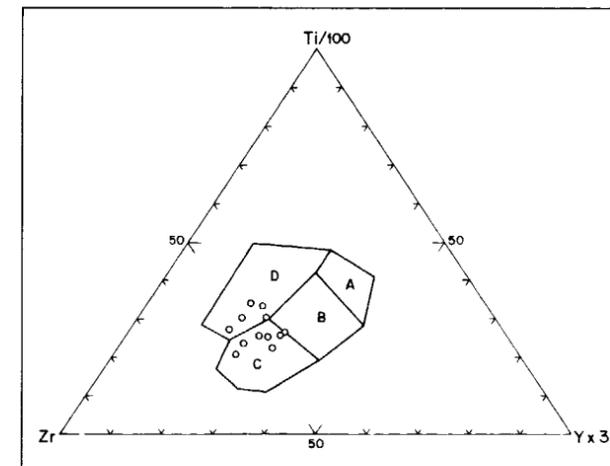


Fig. 14.- Triángulo Ti/100-Y\*3-Zr (Pearce y Cann 1973) indicando la dispersión hacia el campo intraplaca (D) de los basaltos calcoalcalinos (C) de I.D.

explicar el paso de un magma toleítico a calcoalcalino.

Weaver et al. (1979) proponen que el magma original del vulcanismo de este sector antártico es un MORB empobrecido, aunque al referirse a I.D. no encuentran muestras con suficiente Cr, Ni y MgO para considerar que algunas de las rocas aflorantes en I.D. pudieran corresponder a un magma primario. Saunders et al. (1980) también encuentran en el vulcanismo de las islas Shetland del Sur valores bajos en Cr y Ni. En la

actualidad comienzan a aparecer muestras con suficiente Cr (540 ppm) y Ni (538 ppm) para poder tratarse de magmas primarios (Tabla 6). No obstante es de interés un replanteamiento de estos cálculos teniendo en cuenta la posibilidad de existencia de magmas básicos de distinta procedencia.

**Condiciones del magma**

Baker et al. (1975) establecen para I.D. que el magma se generó a una P < 10Kb basándose en la coexistencia de olivino y plagioclasa. La fusión se produciría en la porción de manto afectado por la deshidratación de la corteza subducida.

El geotermómetro de Albarede (1992) aplicado a los basaltos de I.D. da una Temperatura media de 1178°. Estos datos se correlacionan bien con los valores que Plank y Langmuir (1988) consideran apropiada para los magmas basáltico-andesíticos.

Si se considera que los enclaves plutónicos guardan relación genética con las vulcanitas, se tiene en cuenta el geobarómetro para anfíbol cálcico de Hammarstron y Zen (1986) y Hollister et al. (1987), en la muestra de tonalita se obtienen valores orientativos de 4,4 y 4,6 Kb, para la presión de cristalización.

Jakes y White (1972a) encuentran que la hornblenda es estable entre 2,5 y 10 Kb, por lo que una temperatura elevada puede ser la causa de la no aparición de anfíbol en las andesitas de I.D.

**DISCUSION**

El carácter calcoalcalino de la serie y la adscripción de este vulcanismo de I.D. a un proceso de subducción encaja con las características químicas y evolutivas de las rocas analizadas. La secuencia toleítica-calcoalcalina es representativa de zonas de subducción (Jakes y White 1970, 1972b), Rouer et al. (1989), Hunter y Blake (1995). Los basaltos de arco-isla tienen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≈ 16%, variando entre 14 y 17,5 en rocas de bajo K con igualmente bajos contenidos en TiO<sub>2</sub> y FeO (Jakes y White 1972b), viendo estas características análogas a las que se encuentran en I.D.

Otros autores como Baker et al. (1975) encuentran que las relaciones Ni/Co y V/Cr en los basaltos de I.D. se sitúan en el rango de valores de basaltos de alta alúmina de arco-isla (Taylor et al. 1969). Sin embargo se encuentran algunas divergencias con datos aportados por otros autores. Las relaciones Th/Rb = 0,14 que Saunders et al. (1980) citan como características de las islas Shetland del Sur no parecen corresponder con los encontrados en I.D. con Th/Rb > 0,2. Igualmente Fisk (1990) encuentra valores de  $Na_2O/K_2O > 14$  que no son característicos de rocas de arco-isla. Sin embargo los datos aquí presentados muestran, para parte de los basaltos, valores inferiores característicos de arco-isla, pudiendo en otros casos corresponder a series toleítica transicional y alcalina, lo que indicaría la compleja evolución del ambiente geodinámico de I.D.

Otros datos que confirman la adscripción a una tipología de arco-isla es la relación Rb/Sr (Yanagi y Yamshita 1994) que con valores entre 0,05 y 0,28 para rocas con SiO<sub>2</sub> entre 60-66% son igualmente característicos de este ámbito. Estos mismos autores especifican como normal en estas series, un gap en SiO<sub>2</sub> entre 60 y 69, y presencia de basaltos y dacitas.

El carácter reciente de las erupciones en Decepcion cuestionaría, como indican algunos autores, que el proceso de subducción hubiese finalizado hace 4 m.a. Más bien las características de este volcanismo abogan por la iniciación de un nuevo proceso de subducción en época reciente de la placa Drake.

Los datos aportados por (Larter y Barker 1991) y (Pearce et al. 1995) muestran que la subducción primera, que comenzaría en tiempos cretácicos y afectaría a las placas pacífica y antártica, manifiesta unas velocidades de 22 a 34 mm/año para un tiempo correspondiente a 6 m.a., aunque estos valores pudieron ser tan altos como 1 cm/año hace 35 m.a. Así la secuencia calcoalcalina con bajo contenido en K de I.D. puede representar el inicio de un nuevo ciclo en el proceso de subducción. Una prueba para la existencia de este segundo proceso de subducción, entre la placa oceánica Drake y la placa Shetland, radicaría en el alto-K de la serie volcánica correspon-

diente a la primera subducción en contraste con el volcanismo de bajo-K encontrado en Decepcion.

Efectivamente la evolución a términos ricos en K<sub>2</sub>O no está presente en I.D., y el que no haya términos más altos en K puede ser debido a que la evolución volcánica no es muy madura.

Algunas de las pautas "anómalas" encontradas en I.D., como las tendencias de variación de algunos elementos (FeO\*, MnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, V... etc.), presencia simultánea de basaltos con Qz y Ne normativos, junto a diferencias observadas en la posición de basaltos sobre diagramas de caracterización geodinámica, apoyarían la existencia de un magmatismo anterior que no estuviera en relación con la evolución magmática actual en I.D., es decir de dos episodios volcánicos representativos de distintos estadios en la evolución geodinámica de la isla.

En este sentido (Ortiz et al. 1994) detectan algunos seismos profundos ( $\approx 100$  Km) que estos autores asignan a la actividad intraplaca. Previamente Pelayo y Wiers (1989) observan igualmente seismos de este tipo en las Shetland del Sur que achacan igualmente al proceso de subducción.

La variación de K<sub>2</sub>O, en relación con SiO<sub>2</sub>, asimilando la tendencia de variación de I.D. con la más próxima de Izu-Bonin (Nielson y Stoiber 1973) nos daría una profundidad para la placa y generación de magma asociado de 127 a 170 km.

La variación de Na<sub>2</sub>O y de MgO propuesta por Plank y Langmuir (1988) para valores  $Na_6=2,95$ , que corresponde a un espesor cortical de 37 Km, se muestra coincidente con los últimos valores obtenidos por métodos sísmicos (Guterch et al. 1985). La ausencia de series volcánicas alcalinas recientes con cierta extensión y volumen se explicaría por no haberse alcanzado las fases extensivas que caracterizan el final del proceso de subducción.

Pearce et al. (1995) en el estudio del quimismo de las vulcanitas de las Islas Sandwich del Sur, define una serie volcánica con un quimismo y evolución idéntico al de I.D. con toleitas de Bajo K

y rocas calcoalcalinas. Para ellos la placa subduce 55 mm/año con una inclinación de 45-55°. No obstante, la velocidad de subducción en la zona de las Shetland del Sur es más reducida y del orden de 5 mm/año según Barker (1976) y Weaver et al. (1979).

En la figura 15, se ha esquematizado el marco geodinámico de la isla con la zona de fusión inducida en el manto donde se generan los magmas aflorantes en I.D. La anterior área de subducción entre las placas pacífica y antártica quedaría situada a la derecha del esquema (Fig. 1).

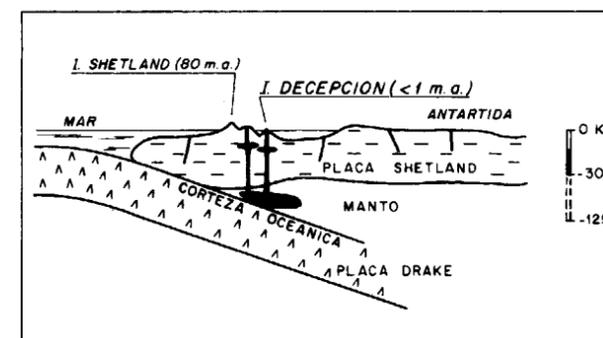


Fig. 15.- Esquema de situación de I.D. en el proceso de subducción de la placa Drake.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado a través del proyecto de la CICYT ANT95-0854C03-01 "Volcanismo, sismicidad, magnetismo y geodinámica de las Shetland del Sur". Nuestro agradecimiento a los Dres. A. García y R. Ortiz, coordinadores de estos proyectos, por su apoyo y colaboración. Al Dr. F. Bellido por sus correcciones, críticas, e ideas que han contribuido notablemente a desarrollar el trabajo.

Los trabajos de campo fueron efectuados gracias a la inestimable ayuda de las armadas española y argentina y de la colaboración del personal civil y militar del refugio español Gabriel de Castilla y base argentina en Isla Decepcion, en las diferentes campañas que desde 1991 se realizaron.

A nuestros compañeros M.C. Sendra, M.T. Montero, J. Arroyo, A. Vilorio, M. Castillejo por su ayuda en la elaboración del trabajo.

## Localización de muestras analizadas

- 5448 - Bahía Fumarolas. Basalto
- 5440 - Terraza Kendall. Basalto plagioclásico
- 5441 - Terraza Kendall. Basalto olivínico
- 5443 - Lago Irizar. Basalto olivínico
- 6592J - Lago Irizar. Basalto plagioclásico
- 6595 - Lago Irizar. Basalto
- 6597 - Lago Irizar. Basalto
- 6598 - Lago Irizar. Basalto
- 6601 - Lago Irizar. Basalto plagioclásico
- 6717 - Colada inferior. Crater lake. Basalto
- 7355 - Lago Irizar. Toba basáltica
- 7364 - Lago Irizar. Basalto
- 7364A - Lago Irizar. Basalto holocristalino
- 7379 - Lago Irizar. Basalto
- 7514 - Obelisco. Toba basáltica
- 7517 - Lago Irizar. Basalto
- 7643 - Pta. Descubierta. Andesita basáltica/Colada
- 5435 - Bahía Fumarolas. Andesita basáltica
- 5436 - Bahía Fumarolas. Andesita basáltica
- 5437 - Bahía Fumarolas. Andesita basáltica
- 5438 - Bahía Fumarolas. Andesita basáltica
- 5449 - Bahía Fumarolas. Andesita basáltica
- 5450 - Bahía Fumarolas. Andesita basáltica
- 6594 - Escarpe Lago Irizar. Andesita basáltica
- 6596 - Escarpe Lago Irizar. Andesita basáltica
- 6599 - Laderas Lago Irizar
- 6600 - Laderas Lago Irizar. Andesita basáltica
- 6602 - Murature. Andesita basáltica
- 6468 - Cerro Caliente. Andesita basáltica
- 6469 - Cerro Caliente. Andesita basáltica
- 6473 - Muro lamentos. Andesita basáltica
- 6588A - Erupción histórica 1842. Andesita basáltica
- 7357 - Lago Irizar. Andesita basáltica
- 7364B - Lago Irizar. Andesita basáltica holocristalina
- 7365 - Bahía Fumarolas. Colada base. Andesita basáltica
- 7376 - Escarpes Lago Irizar. Andesita basáltica
- 7377 - Escarpes Lago Irizar. Andesita basáltica
- 7360 - Bahía Fumarolas. Andesita basáltica
- 7361 - Bahía Fumarolas. Andesita basáltica
- V-2 - Obelisco. Toba vítrea. Andesita basáltica
- 7516 - Pta. Descubierta. Colada. Andesita basáltica
- 7642 - Erupción histórica 1969. Andesita
- 6467 - Muro Lamentos. Andesita

- 6471A - Murature. Andesita  
 6471B - Murature. Andesita  
 6589B - Erupción 1967 (Marinero Suárez). Andesita  
 6590H - Terraza Kendall. Andesita  
 6591I - Pta. Llana. Colada. Andesita  
 7369 - Kroner Lake. Andesita  
 7372 - Erupción 1970. Andesita  
 5444 - Croshill. Obsidiana. Dacita  
 5445 - Croshill. Pómez. Dacita  
 5446 - Croshill. Obsidiana. Dacita  
 6718 - Croshill. Escoria. Dacita  
 5447 - Croshill. Obsidiana. Dacita  
 6445 - Croshill. Obsidiana. Dacita  
 6472 - Croshill. Obsidiana. Dacita  
 7371 - Croshill. Obsidiana. Dacita  
 7370 - Croshill. Obsidiana. Dacita  
 7367 - Croshill. Pómez. Dacita

#### Enclaves

- 5442 - Kendall. Gabro olivínico  
 6444 - Crater Chacao. Gabro  
 7515 - Crater Sucio. Gabro  
 5439 - Crater Lake: Trondhjemitita  
 6470 - Kendall. Tonalita

#### REFERENCIAS

- ACOSTA J., CATALAN M., HERRANZ P., SANZ J.L. (1990). Perfiles sísmicos en las Shetland del Sur y estrecho de Bransfield, estructura y dinámica reciente. *Actas del 3º Symposium español de estudios antárticos*. CICYT. Madrid. 281-296.
- ACOSTA J., HERRANZ P., SANZ J.L. (1992). Perfiles sísmicos en el rift de Bransfield. Campaña Exantarte 90/91. En: *Geología de la Antártida Occidental* (J. López Martínez, ed.). Tomo 3, 195-202. Salamanca.
- ALBAREDE F. (1992). How deep do common basaltic magmas form and differentiate. *Journal of Geophysical Research*, 97, B7, 10997-11009.
- ASHCROFT W.A. (1972). Crustal structure of the South Shetland Islands and Bransfield Strait. *British Antarctic Survey Scientific Reports*, 66, 43 pp.
- BAKER P.E., Mc. REATH M.A., HARVEY M.R., ROOBOL M.J., DAVIES T.G. (1975). The Geology of the South Shetland Islands: V. Volcanic evolution of Deception Island. *British Antarctic Survey Scientific Reports*, 78, 81 pp.

BARALDO A. (1989). *Caracterización de los depósitos piroclásticos del conjunto inferior de Isla Decepción. Islas Shetland del Sur, Antártica*. Trabajo final de Licenciatura. Dpto. Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Buenos Aires, 75 pp.

BARKER P.F. (1976). The tectonic framework of Cenozoic volcanism in the Scotia Sea Region. A review. In: *Andean and Antarctic Volcanology problems* (O. González-Fernández, ed.). IAVCEI. Roma, 330-346.

BARKER P.F. (1970). Plate tectonics of the Scotia Sea region. *Nature*, 228, 1293-1297.

BARKER P.F. (1982). The Cenozoic subduction history of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula: ridge crest-trench interactions. *Journal of the Geological Society of London*, 139, 787-801.

BIRKENMAJER K. (1992). Volcanic Succession at Deception Island, West Antarctica: a revised lithostratigraphic standard. *Studia Geologica Polonica*, 101, 27-82.

FISK M.R. (1990). Volcanism in the Bransfield Strait, Antarctica. *Journal of South America Earth Sciences*, 3, 91-101.

GARCIA A., VIRAMONTE J.G., VILA J., IBAÑEZ J.M. (1990). Estudio del campo magnético en Port Foster Isla Decepción. *Actas del Tercer Symposium de Estudios Antárticos*. CICYT. Madrid, 244-249.

GONZALEZ-FERRAN O. (1971). Síntesis de la evolución volcánica de Isla Decepción y la erupción de 1970. *Inst. Antart. Chil. Contr.* 2 (1), 1-14.

GONZALEZ-FERRAN O. (1985). Volcanic and tectonic evolution of the northern antarctic peninsula. Late cenozoic to recent. *Tectonophysics*, 114, 389-409.

GONZALEZ-FERRAN O., KATSUI Y. (1970). Estudio integral del volcanismo cenozoico superior de las Islas Shetland del Sur Antártida. *Inst. Antart. Chil. Ser. Cient.* 1(2), 123-174.

GONZALEZ-FERRAN O., MUNIZAGA F., MORENO H. (1970). Síntesis de la evolución volcánica de la Isla Decepción y la erupción de 1970. *Inst. Antart. Chil. Servi. Cient.* 2, 1-14.

GUTERCH A., GRAD M., JANIK T., PERCHUC E., PAJCHEL J. (1985). Seismic studies of the crustal structure in west Antarctica 1979-1980. Preliminary Results. *Tectonophysics*, 114, 411-429.

HAMMARSTROM J.M., ZEN, E-AN (1986). Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer. *Amer. Min.* 71, 1297-1313.

HAWKES D.D. (1961). The geology of the South Shetlands Islands. II the geology and petrology of Deception Island. *Falk Isl. Dep. Surv. Sci. Repts.*, 27, 1-43.

HAWTHORNE F.C. (1983). The crystal chemistry of the amphiboles. *Canadian Mineralogist*, 21, 173-480.

HOLTEDAHL O. (1929). On the geology and physiography of some Antarctic and Subantarctic islands. *Sci. Res. Norw. Antarctic. Exp.*, 1927-1929, 3, 1-172.

HOLLISTER L.S., GRISSOM G.C., PETERS E.K., STOWELL H.H., SISSON V.B. (1987). Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *Amer. Min.*, 72, 231-239.

HUNTER A.G., BLAKE S. (1995). Petrogenetic evolution of a transitional tholeiitic-calc-alkaline series: Towada Volcano, Japan. *Journal of Petrology*, 36, 1579-1605

IRVINE T.N., BARAGAR W.R.A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Science*, 8, 523-548.

JAKES P., WHITE A.J.R. (1970a). K/Rb ratios of rocks from island arcs. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 34, 849-856.

JAKES P., WHITE A.J.R. (1972b). Hornblendes from calc-alkaline volcanic rocks of island arcs and continental margins. *American Mineralogist*, 57, 887-902.

JAKES P., WHITE A.J.R. (1972). Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas. *Geological Society of American Bulletin*, 83, 29-40.

KELLER R.A., FISK M.R., WHITE W.M., BIRKENMAJER K. (1992). Isotopic and trace element constraints on mixing and melting models of marginal basin volcanism, Bransfield Strait, Antarctic. *Earth and Planet. Science Letters*, 111, 287-303.

LARTER R.D., BARKER P.F. (1991). Effects of ridge-crest-trench interaction on Antarctic-Phoenix Spreading: Forces on a young subduction plate. *Journal of geophysical Research*, 96, B12, 19583-19067.

LETERRIER J., MAURY R.C., THONON P., GIRARD D., MARCHAL M. (1982). Clinopyroxene composition a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, 59, 139-154.

MALDONADO A., ALDAYA F., BARAZA J., COMAS M.C., DIAZ J.L., FARRAN M., LARTER R.D., MIRALLES L., RAMOS E., VISERAS C., ROUSSANOV M. (1992). El Margen continental antártico al norte de las islas Shetland del Sur: Análisis preliminar de su tectónica, estratigrafía y paleoceanografía, Campaña B/O Hespérides 92. En: *Geología de la Antártida Occidental* (J. López Martínez, ed.). Tomo 3 pp, 173-183, Salamanca.

MARTI J., BARALDO A. (1990). Pre-caldera pyroclastic deposits of Deception Island (South Shetland Islands). *Antarctic Science*, 2, 345-352.

MARTI, J., BARALDO A., REY J. (1990). Origen y estructura de la Isla Decepción (Islas Shetland del Sur). *Actas del tercer symposium español de Estudios Antárticos*. CICYT, Madrid, 187-194.

NIELSON D.R., STOIBER R.E. (1973). Relationship of potas-

sium content in andesitic lavas and Depth to the Seismic Zone. *Journal of Geophysical Research*, 78, 6887-6892.

OLSACHER J. (1956). Contribución a la geología de la Antártida occidental. I contribución al conocimiento de la Isla de Decepción. *Inst. Antart. Argent. Publ.* 2, 25-76.

ORTIZ R., VILA J., GARCIA A., CAMACHO A.G., DIEZ J.L., APARICIO A., SOTO R., VIRAMONTE J.G., RISSO C., MENEGATTI N., PETRINOVIC I. (1992). Geophysical features of Deception Island. En: *Recent progress in Antarctic Earth Science* (Y. Yoshida et al. eds.), 443-448.

ORTIZ R., BLANCO I., RISSO C. (1994). Actividad sísmica y volcánica en el entorno de las islas Shetland del Sur y Peninsula Antártica. *Informe sobre las Actividades Científicas de España en la Antártida*. Campaña 93-94. CICYT, Madrid 181-198.

PEARCE T.H. y CANN J.R. (1973). Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19, 293-300.

PEARCE T.H., GORMAN B.E., BIRKETT T.C. (1977). The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 36, 121-132.

PEARCE J.A., BALKER P.E., HARVEY P.K., LUFF I.W. (1995). Geochemical evidence for subduction, fluxes, mantle melting and fractional crystallization beneath the South Sandwich Island Ar. *Journal of Petrology*, 36, 1073-1109.

PELAYO A.M., WIENS D.A. (1989). Seismotectonics and relative plate motions in the Scotia Sea region. *Journal of Geophysical Research*, 94, 7293-7320.

PLANK T., LANGMUIR CH.H. (1988). An evaluation of the global variations in the major element chemistry of arc basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 90, 349-370.

REX D.C. (1976). Geochronology in relation to the Stratigraphy of the Antarctic Peninsula. *Bull Br. Antarctic Surv.*, 43, 49-58.

REY J., DE ANDRES JR., FERNANDEZ-LOPEZ J.M. (1990). Tectónica reciente en los depósitos submarinos de la bahía de Decepción. *Actas del tercer symposium español de Estudios Antárticos*. CICYT, 258-270.

REY J., SOMOZA L., MARTINEZ-FRIAS J. (1995). Tectonic, volcanic and hydrothermal event sequence on Deception Island (Antarctica). *Geo. Marine Letters*, 15, 1-8.

RISSO C., APARICIO A., VIRAMONTE J.G. (1990). Los enclaves de las rocas volcánicas de Terraza Kendall y Bahía Murature, isla Decepción, Shetland del Sur, Antártica. *Actas del Tercer Symposium Español de Estudios Antárticos*. CICYT, Madrid. 199-202.

RISSO C., BARALDO A., VIRAMONTE J.G. (1992). Nuevos aportes al conocimiento de la geomorfología de la Isla Decepción, Islas Shetland del Sur, Tomo 3, 293-304.

RISSO C., APARICIO A., CASELLI A., ORTIZ R. (1994). Nuevos aspectos petrológicos de la Isla Decepción, Antártica. *Publicaciones Cabildo Insular de Lanzarote. Serie Casa de Los Volcanes*, 3, 201-215.

ROUER O., LAPIERRE H., COULON C., MICHARD A. (1989). New petrological data on mid-Paleozoic island-arc volcanics of northern Sierra Nevada, California: evidence for a continent-based island arc. *Can. J. Earth Sci.*, 26, 2465-2478.

SANTANACH P., PALLAS R., SABAT F., MUÑOZ J.A. (1992). La fracturación en la Isla Livingston, Islas Shetland del Sur. En: *Geología de la Antártida Occidental. Simposios*. Salamanca, 141-152.

SAUNDERS A.D., TARNEY J., WEAVER S.D. (1980). Transverse geochemical variations across the Antarctic peninsula: implications for the genesis of calc-alkaline magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 46, 344-360.

SPELLIE J.L. (1988). Recent observations on the volcanic history of Deception Island, South Shetland Islands. *Brit. Antarct. Surv. Bull.*, 81, 83-85.

STOREY B.C., GARRETT S.W. (1985). Crustal growth of the Antarctic Peninsula by accretion, magmatism and extension. *Geol. Mag.*, 122, 5-14.

TARNEY J., WEAVER S.D., SAUNDERS A.D., PANKHURST R.J. y BARKER P.F. (1982). Volcanic evolution of the Northern Antarctic Peninsula and the Scotia arc. En: *Andesites (orogenic andesites and related rocks)*. Ed. R.S. Thorpe, John Wiley & Sons. Nueva York 371-402.

TAYLOR S.R., KAYE M., WHITE A.J.R., DUNCAN A.R., EWART A. (1969). Genetic significance of Co, Cr, Ni, Sc and V content of andesites. *Geochim. cosmochim. Acta* 33, 275-286.

TROUW R.A.J., GAMBOA L.A.P. (1992). Geotransec Drake passage-Weddell sea. A discussion of the main tectonic features. En: *Geología de la Antártida Occidental* (J. López Martínez, ed.). Tomo 3. Salamanca, 117-126.

VIRAMONTE J.G., SUREDA R., FOURCADE N.H. (1974). Estado volcánico de la Isla Decepción, Islas Shetland del Sur Antártida. *Inst. Antart. Argent.*, Contr. 174, 1-11.

WEAVER S.D., SAUNDERS A.D., PANKHURST R.J., TARNEY J. (1979). A geochemical study of magmatism associated with the initial stages of back-arc spreading. *Contr. Mineral. Petrol.* 68, 151-169.

YANAGI T., YAMASHITA K. (1994). Genesis of continental crust under island arc conditions. *Lithos* 33, 209-223.

Original recibido: Junio 1996.  
Original aceptado: Noviembre 1996.

## AGUAS SUBTERRANEAS

## MODELIZACION ESTOCASTICA DEL ACUIFERO DEL RIO VELEZ (MALAGA): APLICACION AL DISEÑO DE REDES DE CONTROL DEL NIVEL PIEZOMETRICO.

Por J. L. GARCIA-AROSTEGUI (\*), M. C. BUESO (\*\*), J. CRUZ-SANJULIAN (\*), J. M. ANGULO (\*\*), F. J. ALONSO (\*\*), y J. BENAVENTE (\*)

## RESUMEN

El desarrollo económico de la comarca malagueña de la Axarquía está basado en buena medida en la utilización de las aguas subterráneas del acuífero aluvial del río Vélez para la agricultura. La intensa explotación del acuífero exige un cuidadoso control de la piezometría y de las características hidroquímicas habida cuenta el riesgo de intrusión marina, entre otros efectos indeseables. El elevado número de captaciones y de piezómetros de observación existentes aconseja diseñar una red de control que permita optimizar la representatividad de la información obtenida en el mínimo número de puntos de observación.

Se ha realizado una modelización estocástica espacial del acuífero para obtener una primera solución al diseño de una red piezométrica.

**Palabras clave:** Aguas subterráneas, Control piezométrico, Diseño de redes de control, Modelos estocásticos, Campos aleatorios, Entropía de Shannon.

## ABSTRACT

The economic development of the district of Axarquía, Málaga (Spain) depends to a large extent on the use in agriculture of ground water taken from the river Vélez alluvial aquifer. The intense exploitation of this aquifer requires its piezometric and hydrochemical characteristics to be carefully monitored, bearing in mind the risk of seawater intrusion, among other detrimental effects. The high number of existing pumping wells and monitoring piezometers makes it advisable to design a monitoring network which optimises the representativeness of the information obtained at the minimum number of observation points.

A spatial stochastic modeling of the aquifer has been developed to obtain a first solution for the piezometric monitoring network design.

**Key words:** Ground water, Piezometric monitoring, Monitoring network design, Stochastic models, Random fields, Shannon's entropy.

## 1. INTRODUCCION

El acuífero del río Vélez, con una superficie aproximada de 20 km<sup>2</sup>, en su mayor parte pertenecientes al término municipal de Vélez Málaga, se

extiende de N a S en el sector central de la comarca de la Axarquía, a unos 25 km al Este de Málaga (Fig. 1). El acuífero está constituido por los depósitos aluviales cuaternarios del río Vélez y su afluente principal, el río Benamargosa; en la zona de la desembocadura se ha desarrollado un pequeño delta.

(\*) Instituto del Agua, Universidad de Granada, C/ Rector López Argüeta s/n; 18071 Granada.

(\*\*) Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n, 18071 Granada.

El flujo subterráneo se realiza de Norte a Sur, de tal manera que los gradientes hidráulicos son

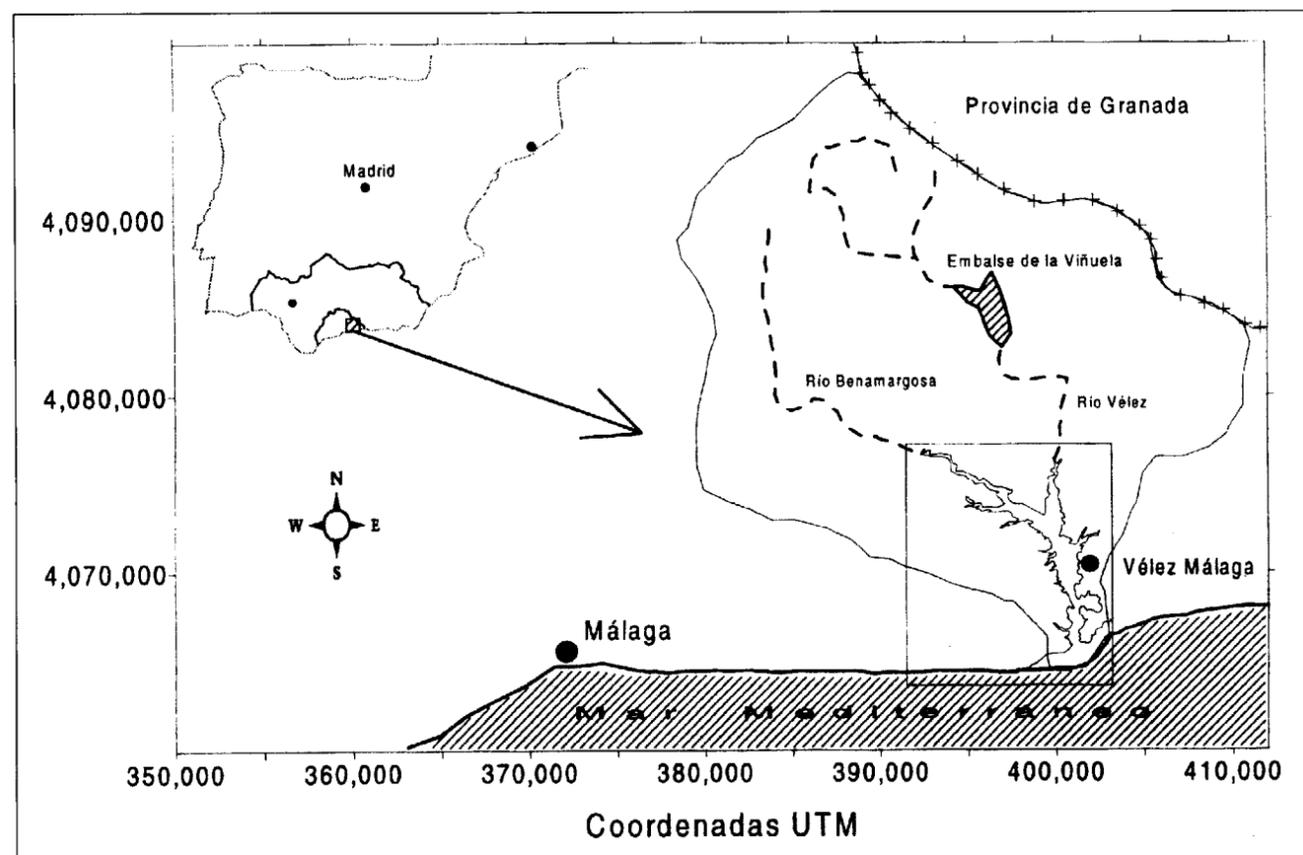


Figura 1. Situación geográfica de la región estudiada.

elevados en el sector de cabecera y se suavizan notoriamente aguas abajo de la confluencia de los ríos Benamargosa y Vélez. En el sector deltáico los gradientes hidráulicos son muy débiles.

Sobre los afloramientos del acuífero se desarrolla una intensa actividad agrícola, especialmente de cultivos tradicionales de huerta y caña de azúcar; más recientemente se ha incorporado la producción de cítricos (en el sector de Benamargosa) y en los últimos 20 años la de aguacate. De este modo, con las aguas subterráneas del acuífero se riegan más de 4000 ha de cultivos, de los que buena parte, principalmente aguacates, se encuentran abancalados sobre los afloramientos de los materiales esquistosos del Paleozoico y limo-arcillosos del Plioceno, que constituyen el sustrato de la formación aluvial.

Varios son los factores que han dado lugar en los últimos años a un notable incremento en el

número de obras de captación de aguas subterráneas: en primer lugar, la creciente demanda derivada de la progresiva puesta en regadío de nuevas superficies y, por otra parte, la disminución en los recursos disponibles, producida no sólo por la reciente y prolongada sequía, sino sobre todo por la entrada en funcionamiento del embalse de la Viñuela, en la cabecera de la cuenca, que incluso contribuye al abastecimiento urbano de la capital malagueña.

En el periodo comprendido entre 1984 y 1995 prácticamente se ha duplicado el número de captaciones en el acuífero. En la actualidad existen más de 400 puntos de extracción, la mayor parte de los cuales son sondeos que han sustituido a viejos pozos excavados de forma manual. Un buen número de captaciones se encuentran situadas en el sector deltáico o en el tramo aluvial contiguo. Esta concentración de los bombeos ha provocado la salinización de numerosas capta-

ciones y la pérdida frecuente de cosechas (García-Aróstegui *et al.*, 1996). Por otro lado, aunque el uso principal del agua es el agrícola, existen algunas captaciones destinadas al abastecimiento de algunos pequeños núcleos de población. El abastecimiento de agua a la población de Vélez Málaga desde la presa de la Viñuela es complementado ocasionalmente con el bombeo de agua subterránea.

Si a los mencionados pozos de bombeo se añaden los pozos no utilizados y los piezómetros construidos por distintas Instituciones, el número total de puntos de agua supera las 700 captaciones y un centenar de piezómetros. El control riguroso de la evolución piezométrica e hidroquímica del acuífero impone la necesidad de diseñar una red que optimice la labor de campo. Para ello se ha aplicado una modelización estocástica que, en una primera fase, pretende definir una red piezométrica, para abordar con posterioridad el diseño de redes con otros objetivos, principalmente de control hidroquímico. Otro aspecto que está previsto plantear posteriormente, con esta misma metodología, es el de definir la ubicación óptima de nuevos puntos de control, con el fin de ampliar y mejorar la red de observación existente.

## 2. MODELIZACION ESTOCASTICA DE LA PIEZOMETRIA

En los últimos años, muchos autores han estudiado la modelización del campo de piezometría mediante procesos aleatorios espaciales definidos en términos de ciertas ecuaciones en derivadas parciales estocásticas. Así, por ejemplo, bajo la suposición de transmisividades constantes en las direcciones de los ejes, y haciendo coincidir éstos con las direcciones asociadas a los valores extremos de anisotropía, el campo de potencial hidráulico puede modelizarse según la siguiente ecuación (Jones, 1989):

$$T_x \frac{\partial^2 h(p)}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 h(p)}{\partial y^2} - \gamma h(p) = \eta(p)$$

donde  $p=(x,y)'$  es el vector de coordenadas,  $h(p)$  representa la carga hidráulica en la localización  $p$ ,

$T_x$  y  $T_y$  son, respectivamente, las transmisividades en las direcciones de  $x$  e  $y$ ,  $\gamma$  es una constante positiva y  $\eta(p)$  es un *input* aleatorio. En el caso particular en que  $T_x=T_y$ , la división de dicha ecuación por el valor constante de la transmisividad conduce a la expresión

$$\frac{\partial^2 h(p)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h(p)}{\partial y^2} - \alpha h(p) = \varepsilon(p) \quad (1)$$

donde  $\alpha$  es una constante positiva y  $\varepsilon(p)$  es un nuevo *input aleatorio*, que en la práctica se considera como un ruido blanco gaussiano con varianza  $\sigma_\varepsilon^2$ . La ecuación estocástica de Laplace (1) fue considerada por Whittle (1954) para datos observados sobre una malla completa y adoptada por Jones (1989) y Angulo *et al.* (1994) para datos irregularmente observados de piezometría. Supondremos, pues, que la componente aleatoria del campo de piezometría satisface la ecuación (1), lo cual significa que el campo es homogéneo e isótropo, en el sentido estocástico.

Whittle (1954) demostró que, de acuerdo con el modelo representado por la ecuación (1), la covarianza entre dos puntos separados una distancia  $r$  está dada por

$$\Gamma(r) = \frac{\sigma_\varepsilon^2 r}{2\sqrt{\alpha}} K_1(r\sqrt{\alpha})$$

donde  $K_1$  es la función de Bessel modificada de segunda clase y orden 1. Así, la función de covarianza sólo depende de la distancia  $r$  entre los puntos y la función de correlación se expresa como  $\rho(r) = r\sqrt{\alpha} K_1(r\sqrt{\alpha})$ . Esta función es monótonamente decreciente y decae más lentamente que la función exponencial.

En la práctica puede ocurrir que los datos disponibles de la piezometría estén perturbados por errores de observación de diverso origen. Así, consideramos que las observaciones en  $n$  localizaciones  $p_1, \dots, p_n$  vienen determinadas por la superposición aditiva de un error aleatorio de observación sobre el valor de  $h$ , según la *ecuación de observación* siguiente:

$$h^*(p_i) = h(p_i) + e(p_i), \quad i=1, \dots, n$$

siendo  $e(p_i)$  ( $i=1, \dots, n$ ) variables aleatorias gaussianas incorreladas con media cero, varianza  $\sigma_e^2$  e incorreladas con  $h$ . Se suponen desconocidos los parámetros  $\alpha$ ,  $\sigma_e^2$  y  $\sigma_h^2$ . La función de verosimilitud asociada al modelo también puede expresarse en términos de los parámetros  $\alpha$ ,  $R = \sigma_e^2 / \sigma_h^2$  y  $\sigma_e^2$  (cf. Angulo *et al.*, 1994). Teniendo en cuenta que, de acuerdo con lo anterior,  $h(p)$  y  $h^*(p)$  son variables gaussianas, Jones (1989) y Jones y Vecchia (1993) calcularon la función de verosimilitud asociada al modelo. La evaluación de la verosimilitud requiere el cálculo de la matriz de covarianzas relativa a los datos observados. Para el cálculo de dicha matriz se puede hacer uso de la expresión exacta en términos de funciones de Bessel o bien considerar aproximaciones discretas a partir de la representación espectral de la covarianza. El primer enfoque ha sido considerado por Jones (1989) para la estimación de los parámetros involucrados en el modelo a partir de datos de niveles piezométricos en 93 puntos de agua del acuífero de Saratoga en Wyoming. Angulo *et al.* (1994) propusieron considerar una aproximación de Fourier discreta de la función de correlación, aplicando ésta al mismo ejemplo estudiado por Jones (*op. cit.*). En el estudio realizado en este trabajo a partir de datos piezométricos del acuífero de Vélez, tanto para la estimación de los parámetros involucrados en el modelo como para el cálculo de las matrices de covarianzas implicadas en la metodología para el diseño de la red de observación, se considerará la función de correlación exacta, mediante funciones de Bessel.

### 3. DISEÑO DE REDES DE OBSERVACION

En el muestreo espacial las observaciones se consideran correladas según su localización y se han de tener en cuenta las características de variabilidad espacial de la magnitud estudiada. Bajo un enfoque geoestadístico, la dependencia espacial se define a través del variograma y los criterios de selección hacen uso de las ecuaciones de krigeado, ya que una de las características más importantes de este método es que la varianza de predicción no depende del valor observado de la variable; por tanto, es posible

calcular dicha varianza antes de realizar el muestreo. Uno de los objetivos más comunes en el diseño de redes es la minimización de la varianza de predicción para un conjunto de localizaciones de interés. Para ello, se consideran diversas medidas alternativas de globalización como son promedios o máximos, entre otras. Pueden adoptarse otros criterios más sofisticados, basados en medidas asociadas a la matriz de covarianzas de predicción (determinante, traza, máximo autovalor, máximo valor diagonal, etc.), como proponen Samper y Carrera (1990) y Mardia y Goodall (1993), entre otros.

El planteamiento general de los criterios clásicos de muestreo supone que la variable observada coincide con la variable de interés. En la práctica, puede ocurrir que la variable de interés no sea directamente observable, de modo que las medidas deban referirse a otra variable relacionada con aquélla. En este contexto surge el problema de seleccionar el conjunto de localizaciones en las que realizar las mediciones de la variable observable de manera que se obtenga la mayor cantidad de información posible sobre la variable de interés.

En nuestra investigación se aborda el problema del diseño de una red de observación adoptando un enfoque basado en el concepto de entropía de Shannon (1948). Se supone que se dispone de una variable  $Y$ , potencialmente observable sobre un conjunto de localizaciones  $\Pi$ , y que el objetivo es conocer los valores de una variable de interés, no observable,  $X$  sobre un conjunto de localizaciones  $\Lambda$  (posiblemente diferente de  $\Pi$ ). El problema de diseño consiste en la selección de un subconjunto  $PC\Pi$ , perteneciente a una clase dada, en donde se observará la variable  $Y$  de manera que permita conocer mejor el comportamiento de la variable de interés  $X$ . En el caso estudiado en este trabajo, la variable de interés será la piezometría ( $h$ ) y la variable observable la piezometría afectada por el error de observación ( $h^*$ ). Teniendo en cuenta el objetivo perseguido, parece natural elegir aquel conjunto  $P$  que proporcione, a partir de los valores de  $Y$ , la mayor cantidad de información sobre la variable  $X$  en el conjunto  $\Lambda$ . Dicha información puede cuantificarse estadísticamente en términos de entropía de Shannon.

Denotemos por  $X_\Lambda$  al vector formado por las variables aleatorias  $X(p_i)$ ,  $p_i \in \Lambda$ , y por  $Y_P$  al vector formado por las variables aleatorias muestreadas. Considerando la entropía de Shannon (1948), se define la *cantidad de información sobre  $X_\Lambda$  contenida en  $Y_P$*  como

$$I(Y_P, X_\Lambda) = H(X_\Lambda) - H(X_\Lambda | Y_P),$$

donde  $H(X_\Lambda)$  y  $H(X_\Lambda | Y_P)$  son, respectivamente, la entropía de  $X_\Lambda$  y la entropía condicionada media de  $X_\Lambda$  dado  $Y_P$ , definidas de la forma siguiente:

$$H(X_\Lambda) = E_{X_\Lambda}[-\log f(X_\Lambda)],$$

donde  $f(X_\Lambda)$  es la función de densidad (o masa de probabilidad) de  $X_\Lambda$ , y

$$H(X_\Lambda | Y_P) = E_{(X_\Lambda, Y_P)}[-\log k(X_\Lambda | Y_P)],$$

donde  $k(X_\Lambda | Y_P)$  es la función de densidad (o masa de probabilidad) de  $X_\Lambda$  dado  $Y_P$ . En las expresiones anteriores,  $E$  representa la esperanza con respecto a la distribución de la variable correspondiente.

De acuerdo con lo anterior, el problema de diseño *óptimo* de muestreo consiste en encontrar el conjunto  $\tilde{P}$  tal que

$$\tilde{P} = \arg \max_{(P)} I(Y_P, X_\Lambda),$$

o, equivalentemente, dado que  $H(X_\Lambda)$  es una cantidad fija,

$$\tilde{P} = \arg \min_{(P)} H(X_\Lambda | Y_P), \quad (2)$$

donde  $(P)$  representa la clase de todos los subconjuntos *admisibles* de localizaciones de mues-

treo (por ejemplo, se puede considerar un cardinal máximo para  $P$ , o una cota para el coste global de los trabajos de muestreo, etc.).

En particular, si  $Y_P$  y  $X_\Lambda$  son conjuntamente gaussianas, el problema (2) se reduce a encontrar el conjunto  $\tilde{P}$  tal que

$$\tilde{P} = \arg \min_{(P)} \log \left| \sum_{X_\Lambda | Y_P} \right|,$$

donde  $\sum_{X_\Lambda | Y_P}$  es la matriz de covarianzas condicionada del vector  $X_\Lambda$  dado  $Y_P$  y  $|\cdot|$  denota el determinante de la matriz.

En el caso simple en que las variables  $X$  e  $Y$  coinciden y los conjuntos  $\Lambda$  y  $P$  representan, respectivamente, las localizaciones carentes y dotadas de información experimental, se han utilizado criterios análogos en aplicaciones de muestreo espacial, por ejemplo, en los trabajos de Cressie (1991), Christakos (1992) y Mardia y Goodall (1993). El planteamiento anterior generaliza, en el caso gaussiano, métodos clásicos de selección de redes de observación y supone una justificación de algunos de dichos métodos en términos de entropía. Por otra parte, también generaliza criterios en los que se minimiza la entropía de las variables no observadas condicionada a las variables observadas o, equivalentemente, se maximiza la entropía correspondiente a las variables observadas.

En la práctica, se plantea con frecuencia el problema de modificar una red pre-existente y, en particular, la ampliación o la reducción del conjunto de localizaciones de la red de observación. Ambos problemas se resuelven adoptando el método expuesto anteriormente. Si el objetivo es realizar una reducción óptima de la red de muestreo pre-existente,  $PC\Pi$ , eliminando algunas localizaciones de  $P$ , bajo la hipótesis de normalidad el problema consiste en la búsqueda del conjunto de localizaciones a eliminar  $\tilde{P}_d$ , de manera que

$$\tilde{P}_d = \arg \min_{(P_d)} \log \left| \sum_{X_\Lambda | Y_{P-d}} \right|,$$

donde  $(P_d)$  representa la clase de todos los subconjuntos que pueden eliminarse de la red  $P$ .

Para simplificar la labor de computación es conveniente expresar la matriz  $\Sigma_{X_\Lambda|Y_{P-Pd}}$  en términos de  $\Sigma_{X_\Lambda|Y_P}$  (cf. Bueso et al., 1996).

El criterio de selección basado en entropía requiere el cálculo del determinante de una matriz generalmente de dimensión elevada. Por ello, se suelen considerar criterios alternativos basados en otras medidas de la matriz de covarianzas, como la traza, el máximo autovalor o el máximo elemento diagonal. Los criterios anteriores se formulan en nuestro contexto de la siguiente forma:

$$\min_{(P_d)} tr \sum X_\Lambda|Y_{P-Pd}$$

$$\min_{(P_d)} \max_{\lambda_i} \lambda_i^{P-Pd}$$

$$\min_{(P_d)} \max_{\beta_i} \beta_i^{P-Pd}$$

donde  $\lambda_i^{P-Pd}$  y  $\beta_i^{P-Pd}$ ,  $i=1, \dots, N$  ( $N$  es el cardinal de  $\Lambda$ ), son los autovalores y elementos de la diagonal de  $\Sigma_{X_\Lambda|Y_{P-Pd}}$ , respectivamente.

#### 4. APLICACION AL ESTUDIO DEL ACUIFERO DEL RIO VELEZ

El acuífero de Vélez dispone de una importante red de control piezométrico, gracias al especial interés que la Administración viene prestando a esta unidad hidrogeológica. En el año 1984, la Confederación Hidrográfica del Sur de España acometió la realización de 79 sondeos, distribuidos por todo el acuífero en perfiles transversales al río, con el objeto de llevar a cabo medidas piezométricas periódicas. En el sector deltáico se incrementó la densidad de puntos de observación (CHSE, 1987). Además de estos piezómetros, existen otros 9 realizados con anterioridad por el Servicio Geológico de Obras Públicas. En la figura 2 se presenta la localización de estos puntos. Lamentablemente, de los 88 puntos iniciales, en la actualidad tan sólo son utilizables 29, a los

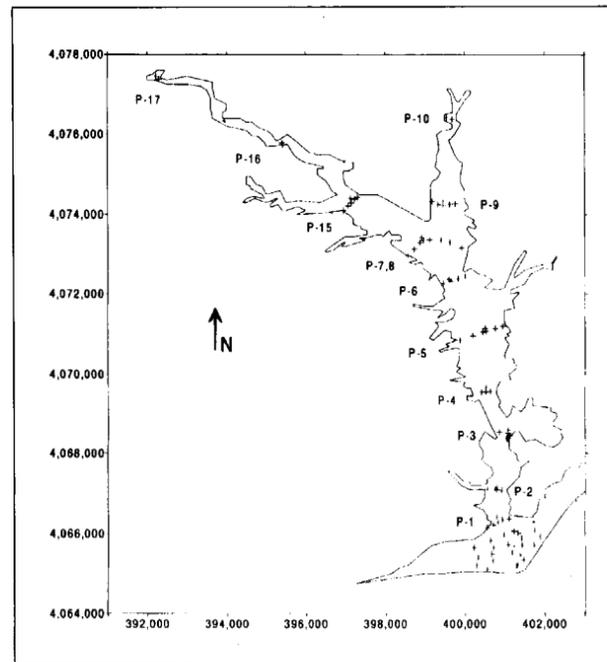


Figura 2. Localización de los 88 piezómetros (CHSE y SGOP) que forman la red inicial.

que hay que añadir 3 nuevos piezómetros construidos por el IGME en 1988. Todos ellos han sido objeto de la adecuada nivelación topográfica.

Para establecer el modelo estocástico que mejor se ajusta al acuífero del río Vélez, se han utilizado las medidas del nivel piezométrico realizadas en 66 localizaciones entre los días 21 y 24 de marzo de 1994 (Tab. 1) y que son, dada su proximidad en el tiempo, las que mejor cumplen la hipótesis de simultaneidad, de todas las numerosas medidas piezométricas realizadas. A continuación se ha planteado el problema de una reducción secuencial de la red piezométrica anteriormente mencionada, constituida por un total de 88 puntos.

El acuífero ha sido discretizado en una malla de 250x250 m, en la que se ha definido como "zona de interés" la situada en el sector deltáico y aluvial próximo (Fig. 3). Esta diferenciación se debe a que, por una parte, en este sector más próximo al mar existen más puntos de observación, con lo que los datos experimentales son más precisos, y, por otra parte, es más necesario conocer con rigor la evolución piezométrica ante el riesgo de

x	y	Cota piezométrica (m S.N.M.)
395000	4075788	71.509
397028	4074353	44.853
396920	4074295	44.793
397028	4074318	43.334
397065	4074220	43.161
397235	4074390	41.921
397823	4073703	36.06
398108	4073688	33.845
398978	4072778	25.39
399434	4075893	47.545
399452	4075898	46.189
399359	4075228	37.063
399378	4074843	34.163
399438	4074685	32.81
399465	4074235	30.298
399540	4073320	27.369
399890	4072990	26.554
399470	4072265	23.215
399448	4072303	23.265
399640	4072320	23.117
399600	4072375	23.972
399930	4071465	16.849
399875	4070850	15.781
400423	4071088	16.069
400780	4071150	16.06
400925	4071040	17.254
400050	4070760	15.722
400710	4070098	12.976
400713	4069963	12.758
400210	4069970	12.319
400453	4069543	11.166
400458	4069448	10.476
400478	4069303	9.93

x	y	Cota piezométrica (m S.N.M.)
400530	4069555	11.585
400530	4069670	12.066
400578	4069333	10.093
400713	4069058	8.892
400888	4068802	7.064
401164	4068658	6.339
400865	4068540	6.27
400938	4068353	5.358
400878	4068118	4.015
400715	4068020	2.938
400978	4067983	3.191
400815	4067903	1.204
400793	4067302	-0.226
400560	4067100	0.81
400726	4066843	-0.043
400778	4066678	-0.396
400545	4066480	-2.839
400620	4066360	-0.387
400753	4066213	-0.268
400830	4066275	-0.275
401100	4066365	-0.325
401002	4065793	-0.039
400790	4065330	0.051
400925	4065515	-0.005
400635	4065820	-0.181
400710	4065650	-0.073
400662	4065490	0.205
400690	4065325	0.076
400425	4065535	-0.463
400220	4065655	-0.191
401645	4066125	0.254
401412	4065890	0.28
401420	4065715	0.203

Tabla 1. Localizaciones y niveles piezométricos iniciales.

intrusión marina. En efecto, dicho sector es el más intensamente explotado, hasta el extremo de que se han detectado conoides con niveles piezométricos hasta 3 metros bajo el nivel del

mar. En resumen, se pretende que los errores de predicción en este sector sean mínimos.

La hipótesis utilizada de que el campo de piezo-

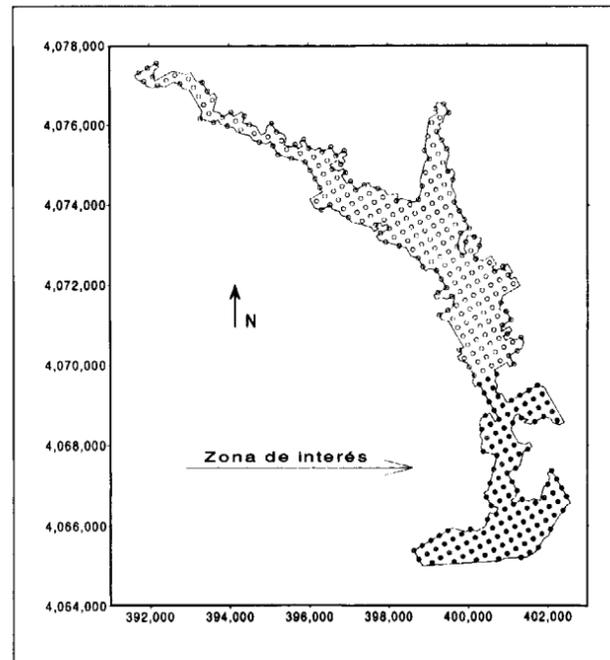


Figura 3. Mallado del acuífero y situación de la zona de interés.

metría es homogéneo en sentido estocástico significa que permanecen constantes la media y la varianza de la componente aleatoria del valor de la piezometría en todas las localizaciones, así como que la covarianza de dicha componente entre dos puntos cualesquiera no depende de la localización de dichos puntos sino de su posición relativa. Consecuentemente, se ha de eliminar cualquier componente determinística detectable en el campo estudiado. En el caso de los datos piezométricos del acuífero de Vélez analizados en este estudio, se observa una componente determinística que se ha ajustado mediante una superficie cuadrática, definida por la ecuación

$$T(x,y) = 6.497603 \cdot 10^6 - 3.949084x - 2.808478y + 1.622016 \cdot 10^{-6}x^2 + 3.134897 \cdot 10^{-7}y^2 + 6.51166 \cdot 10^{-7}xy,$$

con un grado de bondad del ajuste igual a 0.9923. Los residuos así obtenidos representan una realización de la componente aleatoria del campo de piezometría, afectada por el error de observación. Dicha componente aleatoria de la piezometría, desprovista del mencionado error, se ha modelizado utilizando la ecuación de Laplace (1).

Tanto para estimar los parámetros asociados al

modelo como para seleccionar el diseño de la red, se han desarrollado diversos programas en lenguaje FORTRAN 77. La evaluación de la función de Bessel necesaria para el cálculo de la función de covarianza y el cálculo de autovalores se ha realizado implementando las rutinas en FORTRAN 77 desarrolladas por Press *et al.* (1994).

Los valores de los parámetros estimados a partir de la información muestral suministrada por las 66 observaciones utilizadas del acuífero de Vélez son:

$$\hat{\alpha} = 0.00000239, \hat{R} = 0.1063 \text{ y } \hat{\sigma}_e = 0.462925$$

El valor de la estimación del parámetro  $\alpha$  es pequeño, lo cual significa que la función de correlación decae rápidamente y el alcance es pequeño. La estimación obtenida para  $R$  representa la razón entre la varianza del error de observación y la de la variable de interés, es decir, la varianza del error de observación es aproximadamente igual al 10.63% de la varianza de dicha variable.

Suponiendo el modelo estimado como válido, procedemos a la eliminación secuencial de las localizaciones de la red inicial formada por los 88 puntos representados en la figura 2. En la figura 4 se muestran los errores de predicción estimados para el caso en que la red considerada está formada por las 88 localizaciones iniciales. Los valores de los errores de predicción están comprendidos entre 0.2566 y 1.3895, expresados ambos en las mismas unidades que la variable estudiada (en este caso el nivel piezométrico en metros).

En la figura 5 se representan los errores de predicción para la red formada por 22 puntos, obtenida por reducción de la red inicial (Fig. 6). Obviamente, en este caso el rango de valores, entre 0.3570 y 1.4198 (expresados en metros, como en el caso anterior), es mayor que el obtenido considerando la red inicial, aumentando los errores cuando las localizaciones a predecir están alejadas de la zona de interés.

La tabla 2 muestra el orden de eliminación secuencial óptimo de los 88 puntos de la red inicial, así como los correspondientes valores de la

entropía condicionada para la red resultante en cada paso.

Finalmente, en la figura 7 se representan los valo-

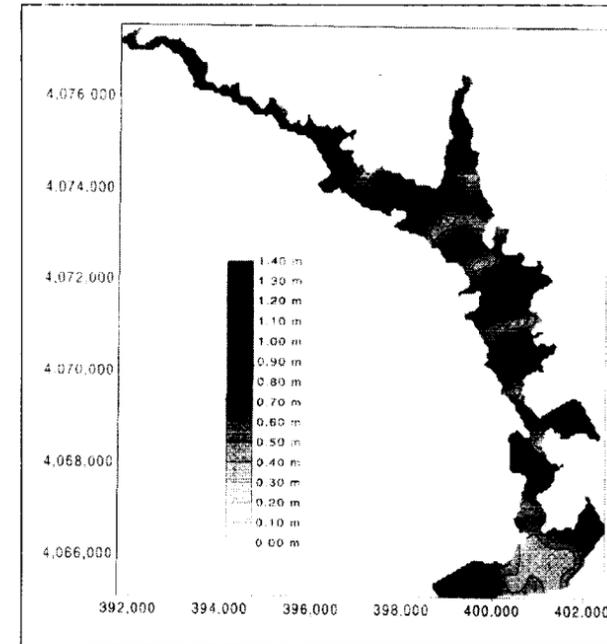


Figura 4. Mapa con la distribución de los errores de predicción en la red inicial de 88 puntos.

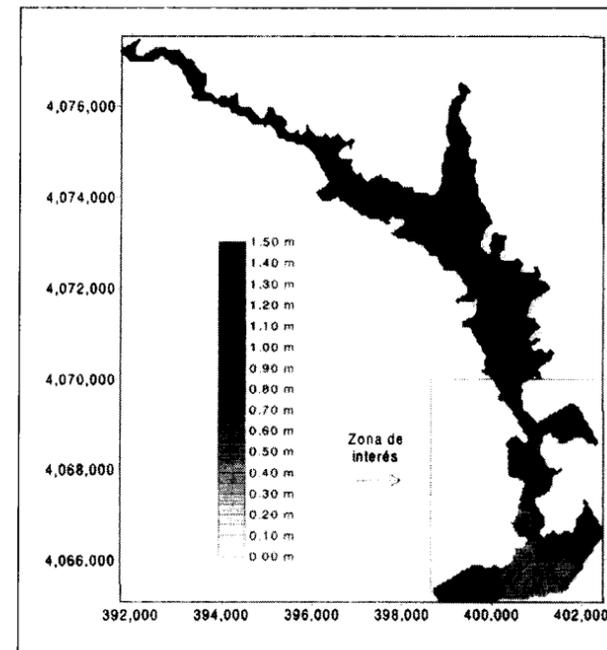


Figura 5. Mapa con la distribución de los errores de predicción en la red final de 22 puntos.

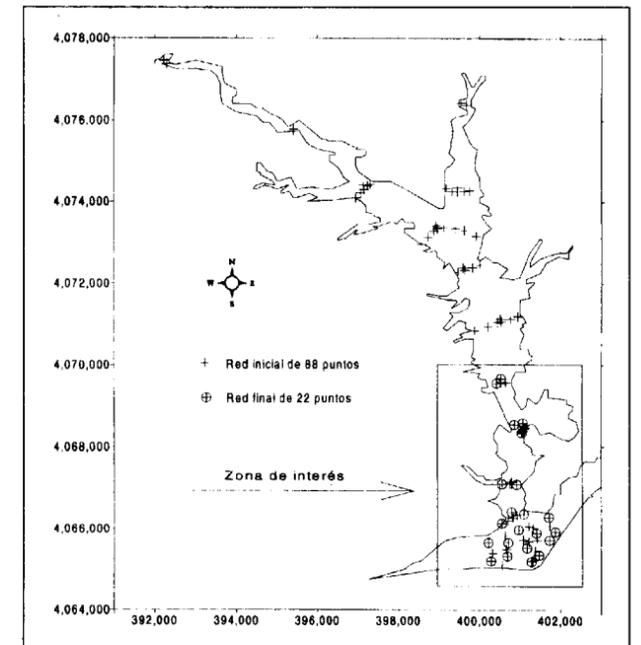


Figura 6. Red inicial de 88 puntos y red optimizada de 22 puntos.

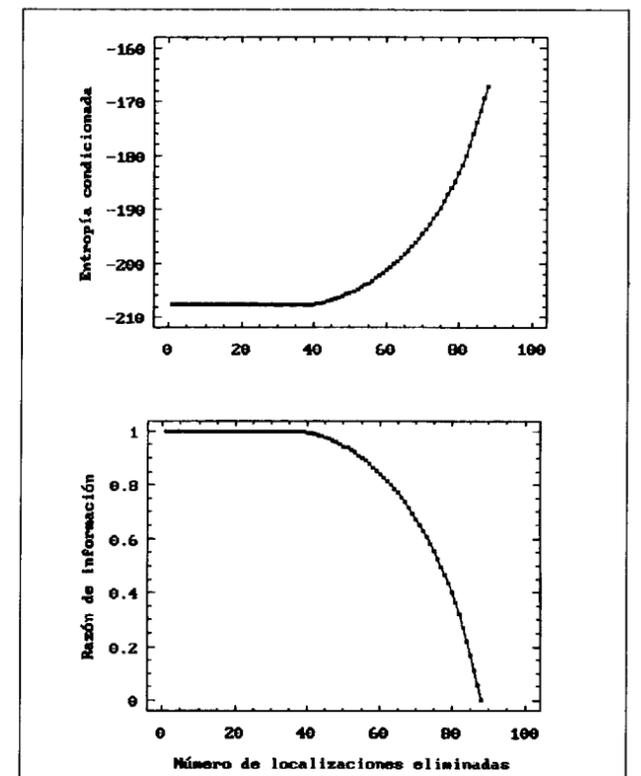


Figura 7. Variación de la entropía condicionada y de la razón de información en función del número de localizaciones eliminadas.

Orden	x	y	Entropía	Orden	x	y	Entropía
1	392290	4077375	-207.697055	45	401225	4066050	-206.751430
2	392215	4077455	-207.697055	46	401180	4065525	-206.534320
3	395400	4075790	-207.697055	47	401075	4068505	-206.311577
4	395415	4075745	-207.697055	48	400530	4069555	-206.052283
5	399690	4076385	-207.697055	49	401218	4065685	-205.764279
6	397065	4074220	-207.697055	50	400760	4067110	-205.476262
7	397235	4074390	-207.697055	51	401325	4066010	-205.162980
8	397150	4074295	-207.697055	52	401375	4065450	-204.830336
9	399550	4076430	-207.697055	53	401120	4068460	-204.454723
10	397135	4074410	-207.697055	54	400662	4065490	-204.066426
11	399185	4074330	-207.697055	55	400935	4066340	-203.665132
12	397305	4074430	-207.697055	56	401420	4065715	-203.229966
13	399625	4074260	-207.697055	57	400705	4066205	-202.760072
14	399465	4074345	-207.697055	58	401312	4065220	-202.286593
15	399335	4074250	-207.697055	59	400555	4065100	-201.805925
16	396950	4074100	-207.697055	60	400635	4065820	-201.260007
17	398965	4073355	-207.697055	61	401740	4066075	-200.701751
18	399465	4074235	-207.697055	62	401080	4065725	-200.140768
19	398875	4073290	-207.697055	63	400325	4065395	-199.570644
20	398920	4073420	-207.697055	64	401218	4066060	-198.969195
21	399125	4073370	-207.697054	65	400795	4067150	-198.359197
22	398575	4072960	-207.697054	66	400650	4069570	-197.717052
23	399765	4074280	-207.697054	67	401730	4065715	-196.929920
24	399410	4073355	-207.697054	68	401175	4065525	-196.123605
25	398730	4073130	-207.697053	69	400970	4065975	-195.281079
26	399920	4073160	-207.697052	70	400420	4069550	-194.427666
27	399600	4072375	-207.697047	71	400795	4066415	-193.569806
28	399640	4072320	-207.697044	72	400865	4068540	-192.679994
29	399830	4072385	-207.697034	73	400710	4065650	-191.706516
30	399630	4073300	-207.697024	74	401470	4065345	-190.729832
31	399470	4072265	-207.696960	75	401050	4068335	-189.681582
32	400450	4071055	-207.696563	76	401412	4065890	-188.500973
33	400010	4072445	-207.695927	77	400690	4065325	-187.274836
34	400512	4071140	-207.694994	78	400925	4067085	-186.006254
35	400535	4071075	-207.694179	79	401715	4066285	-184.729077
36	400200	4070955	-207.691747	80	400220	4065655	-183.343191
37	400765	4071145	-207.687292	81	401100	4066365	-181.840334
38	399875	4070850	-207.670807	82	400555	4066140	-179.994465
39	401090	4068425	-207.626778	83	401875	4065925	-178.058442
40	400950	4071200	-207.557692	84	400285	4065200	-176.044302
41	401105	4068435	-207.481518	85	401075	4068580	-173.909700
42	401075	4068380	-207.337168	86	401285	4065190	-171.665065
43	400795	4067090	-207.169300	87	400530	4069670	-169.404163
44	400830	4066275	-206.963024	88	400560	4067100	-167.131998

Tabla 2. Secuencia de disminución de la red piezométrica.

res de la entropía condicionada en cada paso, así como los correspondientes valores de la razón de información, calculada como

$$\frac{I(X_A, Y_{P-Pd})}{I(X_A, Y_P)}$$

Estos últimos cocientes permiten determinar el número máximo de localizaciones a eliminar para mantener una proporción de información prefijada. Por ejemplo, si se quiere conservar un 75% de la información contenida en la red inicial sobre la zona de interés, bastarían 22 puntos (ver Fig. 7) para obtener dicho porcentaje de la capacidad predictiva, medida en términos de la entropía condicionada.

## 5. DISCUSION Y CONCLUSIONES

El elevado número de captaciones y piezómetros existentes en el acuífero del río Vélez constituye un buen ejemplo de la necesidad habitual de seleccionar una red de observación representativa que permita controlar en el espacio y en el tiempo las variables hidrogeológicas más significativas, como pueden ser, por ejemplo, la piezometría y las características hidroquímicas, utilizando para ello un número de puntos de observación tan pequeño como sea posible, pero que proporcionen suficiente información para los objetivos que se persigan.

Este problema puede abordarse desde distintas perspectivas que incluyen, principalmente, el enfoque geoestadístico clásico, enfoques que hacen uso de los valores del error de predicción en distintas localizaciones de interés, y los de desarrollo más reciente, basados en el concepto matemático-estadístico de entropía, que, aún requiriendo un soporte matemático más sofisticado y complejo, parecen ser los más prometedores por la consideración de la estructura de dependencia global de las variables implicadas, puesto que tienen en cuenta las distribuciones conjuntas de éstas en su totalidad.

Bajo este último enfoque, en este trabajo se aborda el problema del diseño de una red piezo-

métrica. Para ello, se ha adoptado un modelo de Laplace para describir el comportamiento espacial de la piezometría. El valor de los parámetros que caracterizan el modelo, así como la magnitud del error de observación, han sido obtenidos a partir de medidas experimentales que pueden considerarse simultáneas. El modelo así estimado determina la estructura de dependencia espacial de la variable, estructura que constituye la base para la aplicación del procedimiento de diseño de la red de observación. Es importante resaltar que en la medida que el procedimiento de diseño se basa únicamente en el conocimiento de distribuciones de probabilidad conjuntas, éste sería aplicable a cualesquiera otras variables de interés distintas de la piezometría siempre que se conociese o adoptase un modelo de distribución para las mismas.

En el caso del acuífero del río Vélez, se ha cuantificado la información contenida en diferentes redes con distinto número de puntos de observación de la piezometría, optimizando en cada caso la capacidad predictiva. A título de ejemplo, este método ha permitido determinar una red que, incluyendo sólo la cuarta parte de los puntos de observación disponibles inicialmente, proporciona el 75% de la información contenida en el conjunto de la red, expresado en términos de la capacidad predictiva.

En la actualidad se está desarrollando la aplicación de esta metodología considerando conjuntamente la evolución espacial y temporal de una o más variables.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Plan Nacional de I+D (Proyecto AMB93-0932) de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, Ministerio de Educación y Ciencia, España.

Agradecemos también a la Comisaría de Aguas del Sur de España (CHSE, Málaga) las facilidades prestadas para el acceso a la información disponible y a D. Francisco Carrasco Cantos, Profesor de la Universidad de Málaga, su valiosa contribución como experto conocedor de la Hidrogeología del área estudiada.

## REFERENCIAS

ANGULO, J.M.; AZARI, A.S.; SHUMWAY, R.H. y YUCEL, Z.T. (1994).- "Fourier approximations for estimation and smoothing of irregularly observed spatial processes".- In HIPEL, K.W. (ed.): *Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering*, 2, pp. 353-365.

BUESO, M.C.; ANGULO, J.M. y ALONSO, F.J. (1996).- "Redesigning a pre-existing network on a state-space model framework".- In PRAT, A. y RIPOLL, E. (eds.): *Proceedings of the 12th Symposium on Computational Statistics*, pp. 13-14.

CHRISTAKOS, G. (1992).- *"Random Field Models in Earth Sciences"*.- Academic Press, San Diego.

CHSE (1987).- *"Estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa"*.- Proyecto 12/87. Dirección General de Obras Hidráulicas.

CRESSIE, N.A.C. (1991).- *"Statistics for Spatial Data"*.- Wiley, New York.

GARCIA AROSTEGUI, J.L.; CRUZ SAN JULIAN, J.J.; HIDALGO, M.C. y CARRASCO, F. (1996).- "Deterioro de la calidad de las aguas subterráneas en el acuífero del Río

Vélez en el periodo 1985-1994 (Málaga, España)".- *Geogaceta*, 20(6), 1277-1280.

JONES, R.H. (1989).- "Fitting a stochastic partial differential equation to aquifer data".- *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 3, 85-96.

JONES, R.H. y VECCHIA, A.V. (1993).- "Fitting continuous ARMA models to unequally spaced spatial data".- *Journal of the American Statistical Association*, 88, 423, 947-954.

MARDIA K.V. y GOODALL, C.R. (1993).- "Spatial-temporal analysis of multivariate environmental monitoring data".- In PATIL, G.P. y RAO, C.R. (eds.): *Multivariate Environmental Statistics*, Elsevier, pp. 347-386.

PRESS, W.H.; TEUKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W.T. y FLANNERY, B.P. (1994).- *"Numerical Recipes in FORTRAN"*.- Cambridge University Press, Cambridge.

SAMPER, F.J. y CARRERA, J. (1990).- *"Geoestadística. Aplicaciones a la Hidrología subterránea"*.- Gráficas Torres, Barcelona.

SHANNON, C.E. (1948).- "A mathematical theory of communication".- *Bell. System Tech. J.*, 27, 379-423.

WHITTLE, P. (1954).- "On stationary processes in the plane".- *Biometrika*, 41, 434-449.

Original recibido: Enero 1997.

Original aceptado: Abril 1997.

## INTERPRETACION DE DIAGRAFIAS MEDIANTE REDES NEURONALES.

Por M. BALBAS (\*), M. J. BALBAS (\*), R. BENITO (\*), E. CHACON (\*), J. M. ESTEBARANZ (\*), J. C. LOSADA (\*) y F. J. OCARIZ (\*)

## RESUMEN

En este artículo se discuten los medios de sectorización e interpretación litológica de perfiles de sondeo mediante técnicas estadísticas aplicándose a la detección de heterogeneidades. Se utilizan para la interpretación redes neuronales, comparando sus resultados con los obtenidos mediante análisis discriminante (técnica clásica de estadística multivariante) y estableciendo unas conclusiones de orden práctico.

*Palabras clave:* Diagramas, Análisis estadístico, Redes neuronales.

## ABSTRACT

Along this article, the methods of logs sectorization and lithological interpretation by statistical techniques are discussed over the application of them to discrimination of heterogeneities. Neural networks are used, comparing their results with those obtained from Discriminant Analysis (the classical multivariate statistical tool) and several practical conclusions are established.

*Key words:* Logs interpretation, Statistics, Neural networks.

## INTRODUCCION

En muchos aspectos de la ingeniería geológica resulta de especial interés conocer la estructura del subsuelo en profundidad. Cuando esta profundidad es elevada y el estudio de suficiente detalle, la adquisición de datos se realiza fundamentalmente mediante testificación de sondeos, ya sea tradicional con extracción de testigo de roca o geofísica mediante sondas de medición.

Desde hace unos años, se tiende progresivamente a utilizar de forma extensiva la interpretación de perfiles geofísicos, debido a las mejoras de esta técnica y su precio, comparativamente barato (1). Bajo ciertas condiciones, se puede realizar la interpretación de estos perfiles con un apoyo mediante técnicas estadísticas que facilite la labor del geólogo.

Resulta de especial interés la posibilidad de crear funciones matemáticas que emulen los resulta-

dos de sondas modernas, de resolución elevada, en función de los resultados de sondas más antiguas de resolución más grosera. Esto puede permitir evaluar las formaciones atravesadas por sondeos antiguos de forma más rigurosa, aprovechando más la información obtenida por las sondas en su momento (2).

## APLICACION PRACTICA

Una aplicación bastante común en el análisis de diagramas de sondeo es la detección de oquedades naturales en las paredes del pozo. Estas oquedades pueden corresponderse a cavidades kársticas, fallas de diversas escalas y, en general, a cualquier tipo de porosidad secundaria. En diversas aplicaciones de la ingeniería geológica resulta de vital importancia evaluar la porosidad secundaria, y la migración de fluidos a través de la red de drenaje que ésta forma.

Sólo por ilustrar algunas de las posibles aplicaciones de esta interpretación, mencionaremos el

(\*) Universidad Politécnica de Madrid.

almacenamiento de residuos radioactivos, en donde es de vital importancia conocer a fondo las permeabilidades de la roca hospedante y la probabilidad y velocidad de una posible migración de radionucleidos (3); la ingeniería de yacimientos en la exploración petrolífera, donde una pequeña variación en los parámetros porosidad, permeabilidad y recuperación de un yacimiento puede determinar la explotabilidad de éste; el estudio medioambiental de vertederos en su relación con la contaminación de los acuíferos; y finalmente, el estudio de éstos propiamente dichos (ya sea para la explotación de sus recursos o por el aprovechamiento de la energía geotérmica).

LOS DATOS. MARCO GEOLOGICO

Los datos estudiados forman parte de los perfiles geofísicos de cuatro sondeos de gran profundidad (aproximadamente 2,5 km). Los perfiles usados son los recogidos por las siguientes sondas: Calibre (CAL), Gamma Ray (GR), Density (RHOB), Sónico (DT), Resistivos: doble (LLD), somero (LLS) y esférico (MSFL).

Los pozos están separados por distancias lo suficientemente pequeñas como para asegurar la correcta correlación de los tramos en estudio, que están incluidos en un gran paquete de calizas criptocristalinas, de edad jurásica.

La formación atravesada está fuertemente afectada por algún proceso que forzó una gran porosidad secundaria. Este proceso bien pudiera ser una elevada karstificación aunque otros autores se inclinan por una brechificación debida a esfuerzos tectónicos (El área se sitúa en una cúpula anticlinal), sobre este tema no hay acuerdo en la bibliografía consultada. Este extremo está actualmente en discusión, y no entraremos a tomar una postura al respecto, al no influir prácticamente en el presente estudio. En cualquier caso resulta de especial interés destacar que el orden del diámetro de los poros es centimétrico a métrico.

INTRODUCCION A LAS REDES NEURONALES

Las redes neuronales (4) nacieron en los años 60, si bien es en la actualidad cuando han entrado en una dinámica de expansión, con la informática.

Los principales usos a que se destinan son clasificación, memoria asociativa, estimación y predicción.

El procesado de datos mediante redes neuronales está basado en la imitación del funcionamiento del sistema nervioso humano. La unidad fundamental de éste es la neurona, que está conectada y emite señales a otras neuronas mediante prolongaciones, denominadas dendritas, que pueden actuar como activadoras o como inhibidoras de la neurona receptora de la señal.

Todo el proceso biológico es imitado por el algoritmo matemático: en éste se consideran una serie de unidades llamadas nodos o neuronas conectadas entre sí, de manera que la salida de una neurona, forma parte de la entrada de otra(s).

Cada neurona es, a semejanza de su equivalente biológico, un mínimo procesador que suministra, ante una entrada múltiple, una única salida. La conexión de los nodos puede seguir diferentes arquitecturas, que determinan la capacidad de la red.

Otro aspecto de gran interés, y que caracteriza a las redes neuronales, es la capacidad de autoaprendizaje. En todos los casos hay que destacar la capacidad (y necesidad) de aprendizaje previo; un periodo de entrenamiento inicial a fin de que la red pueda "aprender" a desempeñar su función.

ARQUITECTURA NEURONAL

Se considera una neurona como un elemento que a partir de n entradas  $x_i$  genera una salida  $x$  según una función de transferencia. Suponiendo una neurona caracterizada por el índice j (Ripley, 1995):

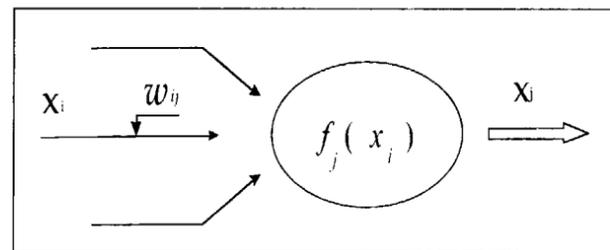


Figura 1.-La Neurona

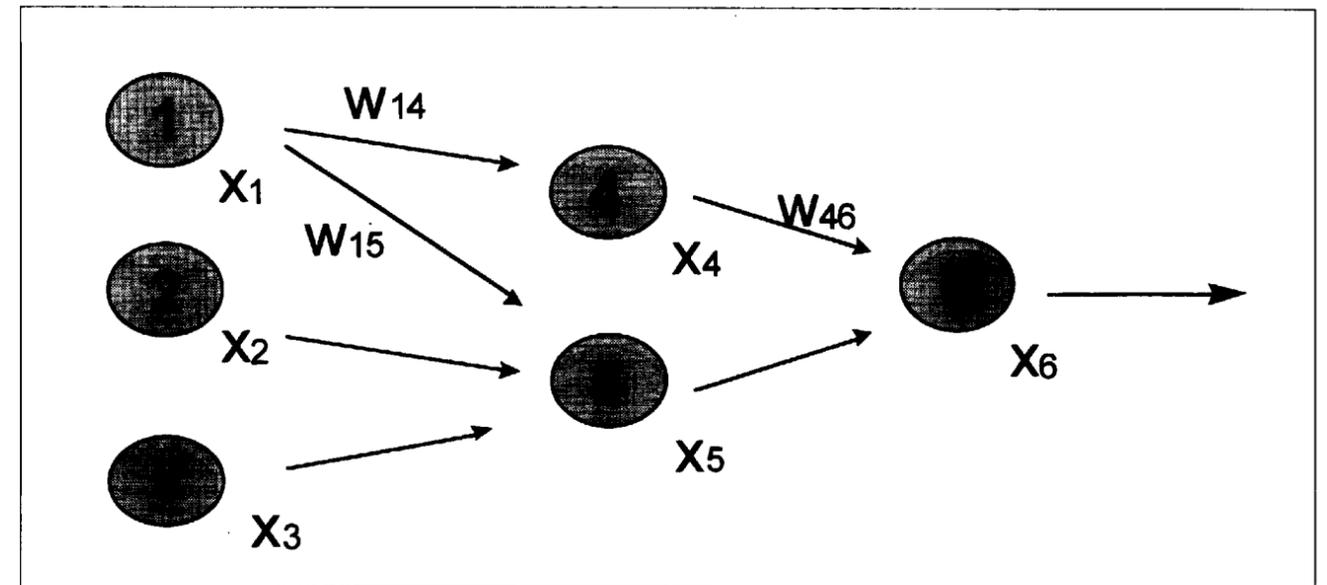


Figura 2.- Arquitectura Feed Forward

$$x_j = f_j \left( \sum_i w_{ji} x_i - h_j \right)$$

donde:

- $f_j$  es una función no lineal monótona creciente denominada *función de activación*.
- $w_{ji}$  son constantes denominadas *pesos sinápticos o pesos de conexión*. Donde j es el índice de la neurona receptora e i el de las que envían sus salidas
- $h_j$  es una constante conocida como *umbral*.

Una red neuronal la constituyen m neuronas interconectadas, de forma que las salidas de unas pueden conformar la entrada de otras. El caso más simple es el de perceptrón progresivo (*feed forward network; Multi-Layer Perceptron*), en el que las neuronas se agrupan en niveles, y las salidas de las neuronas de un nivel son la entrada del siguiente. Un ejemplo de este tipo de estructura puede verse en la Figura 2: Redes feed-forward.

Existen y se utilizan arquitecturas más complejas, en las que las conexiones interneuronales pue-

den saltar una capa, o producir entradas a la misma o a una más baja etapa (retroalimentación).

Dentro de una red se suele utilizar para todas las neuronas la misma función  $f$ , y la función de transferencia de la neurona j queda definida por sus pesos sinápticos y su umbral. La red neuronal queda así mismo resumida por los valores relativos a cada neurona. Estos valores forman el *vector de parámetros*  $w = (w_{ji}, h_j)$  de  $m(n+1)$  componentes, si bien suele escogerse la función de forma que el umbral forme una nueva entrada desde una neurona cero virtual común a todas las entradas, pero afectado en cada una por un peso diferente, o que sea igual y nulo, de forma que el vector de parámetros se expresa:  $w=(w_{ji})$ .

FUNCIONES APLICABLES

Como se ha mencionado, f es una función no lineal monótona creciente. Cualquier función de estas características es aplicable, si bien se suelen escoger funciones cuya primera derivada sea simple por cuestiones prácticas referentes al aprendizaje de la red, que se explicarán más adelante.

Suelen utilizarse funciones como la sigmoide exponencial (Función logística):

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{(x+\theta)}{\theta_0}}}$$

En la que  $\theta_0$  suele igualarse a 1 preparando adecuadamente los valores de  $\theta_j$  y  $w_{ij}$ .

Este funcional se presenta en la ilustración 3: Función tipo (sigmoide exponencial), con los siguientes parámetros  $\theta_0=1$ ;  $\theta_j=0$ .

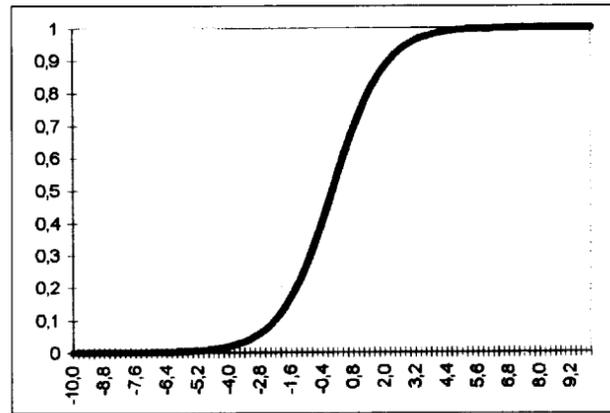


Figura 3.- Función de Activación Típica.

#### ENTRENAMIENTO DE LA RED

El entrenamiento de la red (5) es un periodo en el que se fijan los valores del vector de parámetros  $\vec{w}$ . La elección de estos parámetros es lo que determinará la capacidad final de la red para cumplir adecuadamente su función.

Esto se realiza presentando a la red un conjunto de *patrones* (casos de respuesta conocida), recogiendo su respuesta y minimizando el error. Generalmente se usa el semierror cuadrático:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1..m} \|y^p - c^p\|^2$$

donde:

$y^p$  es la salida obtenida por la red para la entrada  $x^p$   
 $c^p$  es el resultado real esperado.

Para minimizar el error pueden emplearse diversas técnicas de optimización que dan en general mejores resultados y en menos tiempo que los algoritmos propios de las técnicas de redes neuronales, si bien estos permiten un aprendizaje posterior, siempre que se produzca la posibilidad (aparición de nuevos casos patrón), sin tener que repetir el aprendizaje con todo el paquete de muestras de clasificación conocida.

El algoritmo de aprendizaje más común es el conocido como Regla de Generalización de Deltas (*delta generalized rule*) descubierto por Bryson y Ho (1969), conocido como *back propagation*, y que describimos brevemente como ejemplo:

Se presenta un caso conocido a la red, y las entradas  $I_j$  y resultados  $Y_j$  de cada neurona  $j$  son recogidos. Tras presentar una serie de  $p$  patrones, comenzando por la última y acabando en el primer nivel, se generan factores  $\delta_j$  para cada neurona. Finalmente los pesos  $w_{ji}$  son sustituidos por los nuevos  $w_{ji}^*$

$$w_{ji}^* = w_{ji} + \eta \sum_p \delta_j Y_i$$

donde:

$\eta$  es una constante de *longitud de paso* arbitraria

$\sum_p \delta_j Y_i$  son, cambiadas de signo, las derivadas de la función de transferencia de esta neurona respecto a  $w_{ij}$ . Así, en la última neurona obtenemos:

$$\delta_0 = (c - Y_0) f'(I_0)$$

y en las demás:

$$\delta_j = f'_j(I_j) \sum_k w_{jk} \delta_k$$

Ecuaciones en las que (Si se utiliza la función logística como función de activación):

$$f'_j(I_j) = Y_j (1 - Y_j) / \theta_0$$

Y suponiendo realizado el cambio de función propuesto ( $\theta_j=0$ ;  $\theta_0=1$ ) toma la forma:

$$f'(x) = f(x)(1 - f(x))$$

Se trata de un algoritmo muy parecido al de los métodos de gradiente, si bien se optimiza peso a peso (variable a variable). Un elevado paso  $\mu$  garantiza una rápida aproximación a un mínimo, si bien propicia, tal y como ocurre en los métodos de gradiente, una oscilación alrededor de los valores mínimos alcanzables. Para evitar esta oscilación suele introducirse un *término de momento* a fin de suavizar las variaciones de los pesos, creando una inercia:

$$\Delta w_{ij}(t+1) = -\eta \sum_p \delta_j Y_i + \alpha \Delta w_{ij}(t)$$

donde  $\alpha$  es una variable arbitraria, que generalmente toma el valor 0,9.

De esta forma, si la variación de un peso continúa en el mismo sentido, se sustituye esta variación por una mayor. En cambio, si la variación cambia de signo, la inercia hace que la variación sea menor.

La propagación inversa tiende a minimizar  $E$ , si bien no está demostrada la convergencia del proceso en todos los casos. La convergencia de los valores muchas veces parece depender de la adecuada elección de los parámetros arbitrarios  $\mu$  y  $\alpha$ , y de los valores iniciales de los pesos  $w_{ij}$ .

En la práctica, el proceso de aprendizaje se detiene cuando la red clasifica correctamente una proporción aceptable de los casos propuestos (Esta tasa de aciertos en el entrenamiento es mayor que la tasa exigible en funcionamiento normal) o bien cuando el error se estabiliza, lo que significa que ha alcanzado un mínimo local.

#### APLICACION

Se crearon varios ficheros patrón para el entrenamiento de redes encaminadas a la discriminación entre *Roca* y *Hueco*, que contenían los valores tipificados (media 0, desviación típica 1) de los perfiles recogidos en el tramo en estudio.

Se establecieron dos distintos métodos de cálculo del error en cada predicción.

Finalmente, se crearon y entrenaron diversas redes neuronales que se sometieron a estudio bajo los distintos patrones y métodos de error. A continuación se exponen unas breves notas sobre todo el proceso:

#### Patrones

Se crearon dos colecciones de casos modelo. En el primero de los ficheros patrón, se incluyeron casos claramente definidos como roca sólida u oquedad mediante interpretación tradicional. En esta colección la proporción entre *Rocas* y *Huecos* era bastante aproximada a la observada en la formación *in situ*. El segundo fichero patrón, contenía menos casos a fin de que el número de casos correspondientes a *Hueco* fuera equivalente al de *Rocas*.

#### Métodos de cálculo del error

El método de cálculo del error en cada predicción es un parámetro básico en el aprendizaje de la red (2) (4).

En una red como la que necesitamos (clasificadora) hay dos posibles formas de contemplar el error: si la respuesta esperada es continua (una probabilidad de asignación) puede definirse como diferencia entre el valor de ésta y el valor objetivo (1 ó 0), con lo cual será también una variable continua; o, dado que finalmente la respuesta de la red se codificará en forma discreta (el grupo a que cada individuo pertenece), como diferencia entre la clasificación ofrecida y la real, siendo entonces una variable discreta.

#### Error continuo

Esta opción es la opción elemental. En primer lugar porque es el algoritmo general. Con este método de cálculo es como funciona una red aproximadora, y de esta forma se mantiene uniformidad con este otro tipo de redes.

Por otro lado, parece adecuado afirmar que de esta forma el error afecta también a los casos dudosos, aquellos en los que la respuesta de la

red no está saturada. De esta forma, incluso un caso que la red definiese como claro, con un error muy bajo, participaría en la modificación de los pesos. Este tipo de configuración sería la adecuada para permitir a la red una clasificación más extrema, con menor número de casos dudosos.

**Error discreto**

Otra aproximación es considerar que el error sólo existe en caso de que la red clasifique una observación de diferente forma a la que realmente merece. Bajo esta visión y en este particular caso, el error en cada patrón sólo puede tomar los valores cero, uno o menos uno. La respuesta de la red se codifica para que en el cálculo del error sólo se tengan en cuenta aquellas observaciones de roca clasificadas como hueco y viceversa.

La filosofía es más bien práctica: se busca que la red actualice los pesos fijándose sólo en aquellos casos en los que el error sea efectivo. Permite que, siempre que la clasificación sea asimétrica (esto es: acierte siempre en un grupo, pero no en los otros), la actualización tienda a aproximar mejor los casos fallidos.

**Redes detectoras de huecos creadas**

Para los distintos tipo de configuración comentadas, se construyeron diversas redes neuronales, de diferente arquitectura. Estas redes ofrecieron resultados dispares, algunos de los cuales se reflejan en la tabla 1: Clasificación según Redes neuronales.

Error	Patrón	Estructura	Aciertos roca (%)	Aciertos hueco (%)
Continuo	1	7:1	94.16	94.01
Continuo	1	7:2:1	100	0
Continuo	1	7:3:1	100	0
Discreto	1	7:1	93.02	94.6
Discreto	1	7:2:1	18.23	45.46
Continuo	2	7:1	0	100
Discreto	2	7:1	10.21	47.16

Tabla 1: Clasificación según Redes Neuronales

A la vista de estos resultados se optó por mantener, para la discriminación la red de dos capas, con siete neuronas en la primera capa y una en la segunda, entrenada con un error continuo y en el primer patrón.

**COMPARACION CON EL ANALISIS DISCRIMINANTE.**

El mismo tipo de clasificación de las observaciones se realizó mediante la técnica de análisis discriminante. Esta técnica es una herramienta estadística habitual de uso muy extendido que tiene como objetivo establecer criterios para la clasificación de nuevas observaciones en base a una serie de individuos de grupo de pertenencia conocido (6).

El método aplicado es seccionar el espacio  $R^m$  de las observaciones en  $g$  subespacios disjuntos, tantos como grupos conocidos existan, de forma que si una muestra  $i$  se encuentra en su interior sea clasificada como perteneciente a ese grupo.

Supongamos  $k$  grupos multinormales, de igual matriz  $\Sigma$  de covarianzas. Cada muestra será asignada al grupo de cuyo centroide esté a menor distancia de Mahalanobis. Desarrollando dichas distancias finalmente llegamos a una serie de funciones lineales. Si las matrices de covarianzas de los grupos son distintas, según el mismo criterio, conducen a funciones cuadráticas.

Al aplicar análisis discriminante a los patrones, se obtuvieron funciones lineales de discriminación, que aplicadas a los mismos condujeron a un 93.8 % de aciertos.

Puede comprobarse que ambos porcentajes son muy elevados y próximos. Se comprobó además si existía correlación entre las probabilidades de clasificación como agujero según los dos métodos, y con la propia clasificación original, dando lugar a los siguientes resultados:

	HUECOS	ADL GEN
ADL GEN	0.771	1
RED	0.796	0.602

Tabla 2: Correlación entre análisis

La tabla 2 refleja que, efectivamente, al obtener una correlación elevada (0.602) existe una relación bastante lineal entre las probabilidades aproximadas por un método y por otro, si bien no es perfecta y que ambos métodos obtienen bue-

nas correlaciones con la clasificación original, lo que indica que las probabilidades eran suficientemente alejadas de la equiprobabilidad. Posiblemente, si no se ha alcanzado mayor correlación ha sido por el hecho de estar intentando correlacionar variables discretas y continuas. De forma estricta, este uso no es correcto, si bien juzgamos que es bastante ilustrativo sobre la bondad y claridad de la clasificación (hay que considerar, no solamente que la clasificación sea correcta, sino que además haya el menor número posible de individuos "dudosos" con probabilidad de asignación próxima al 50 %).

El hecho de que sólo existiese una capa activa, permitió además comparar el peso relativo que tomaba cada variable en cada uno de los dos métodos. Las observaciones destacaban que la influencia que ejercía cada variable en la decisión era equivalente para ambos métodos.

**CONCLUSIONES**

En primer lugar resulta muy destacable el hecho de que la red neuronal que mejor discernía entre rocas y huecos era, para todas las configuraciones, la más corta, sin neuronas intermedias.

Esto equivale a decir que la mejor red neuronal aplicable a estos valores y con estas condiciones y objetivos es de una única neurona activa, estructura que no es sino un análisis discriminante logístico lineal. En él, según la relación de una combinación lineal de los datos (función discriminante) respecto a un valor determinado (frontera), el individuo es adjudicado a un grupo u otro, si bien se utiliza la función logística para determinar la probabilidad de pertenencia.

Esto no quiere decir que en todas las clasificaciones posibles ocurra una situación análoga (igualdad de bondad de clasificación para los dos tipos de análisis). Tan sólo que en este particular caso es así. La explicación de esta especificidad puede encontrarse en varios posibles puntos: La inexistencia de umbrales o pesos  $h$  en cada neurona, que el mínimo alcanzado para el error no haya sido el mínimo alcanzable por esta red, o que realmente los grupos Roca y Hueco sean separables linealmente (o sea, que exista, en el espacio

de 7 dimensiones sobre la recta generado por las variables observadas en los perfiles, un hiperplano que separe un grupo de otro).

En el primer caso, esta situación puede subsanarse construyendo una red de tipo general en la que todas las neuronas reciban entrada desde una neurona virtual, de salida fija unidad. Al ir variando el peso sináptico asignado, se irá variando la posición del umbral de forma óptima. Para eliminar la segunda posibilidad, pueden realizarse un mayor número de pruebas para comprobar si el error desciende, si bien, incluso aunque exista un mínimo global, no existe certeza de que éste se alcance por muy amplia que sea la experimentación.

Hay que concluir, a la vista del resultado que la aplicación de la red neuronal es apropiada, si bien no difiere (en este caso), y por tanto no extrae más o mejor información de los datos, de la aplicación del análisis discriminante. Sin embargo se recomienda encarecidamente el estudio de las nuevas posibilidades ya comentadas referentes a la aplicación de redes neuronales al presente problema y a otros distintos en los que un análisis lineal podría no ser aplicable.

A manera de conclusión final quisiéramos destacar que la aplicación de redes neuronales puede simplificar en gran manera la labor del interpretador, incluso en casos más complejos que el presente.

**REFERENCIAS**

SCHLUMBERGER LTD. (1972). *Interpretación de perfiles*. Vols I y II. Caracas.

OCARIZ, F.J. (1996). *Análisis de diagrfias de sondeos petrolíferos para la determinación de parámetros característicos de un medio heterogeneo mediante métodos multivariantes y de redes neuronales*. Proyecto Fin de Carrera. ETSI Minas U. P. Madrid.

BALBAS, M.J. (1996). *Simulación de la heterogeneidad del medio geológico fracturado*. Proyecto Fin de Carrera. ETSI Minas U. P. Madrid

STERN, H. (1996). *Neural Networks in Applied Statistics*. Technometrics August vol. 38, American Statistical Association and the American society for Quality Control.

RIPLEY, B.D. (1995). *Statistical aspects of neural networking*. Neural Network and Chaos - Statistical and Probabilistic Aspects. Chapman and Hall. London

CHATFIELD, C AND COLLINS, A.J. (1980). *Introduction to Multivariate Analysis*. Chapman and Hall. London-New York

Original recibido: Enero 1997.  
Original aceptado: Abril 1997.

## SIMULACION DE HETEROGENEIDADES DE FRACTURACION MEDIANTE PROCESOS DE GIBBS.

Por M. BALBAS (\*), M. J. BALBAS (\*), E. CHACON (\*), y F. J. OCARIZ (\*)

### RESUMEN

Se realiza una modelización de las heterogeneidades por fracturación que presenta el medio geológico, utilizando como herramienta estadística los procesos de puntos de Poisson que posteriormente se transforman en procesos de Gibbs, a través de la aplicación de técnicas de Markov, mediante un criterio de rechazo.

*Palabras clave:* Modelización, Fracturas, Procesos estocásticos, Estadística espacial.

### ABSTRACT

A model of the heterogeneities produced by fracturation of the geological medium is carried out in this paper, using Poisson points as statistical tool. These processes are transformed in Gibbs processes through the application of Markov processes, by means of rejection criteria.

*Key words:* Modeling, Fractures, Stochastic processes, Spatial statistics.

### 1. PRESENTACION

En diversos problemas, dentro del ámbito de la ingeniería geológica, cobra un gran interés la caracterización del medio desde el punto de vista de su conductividad hidráulica. Aun cuando se trate en muchos casos de materiales de porosidad intersticial despreciable, la existencia de heterogeneidades de fracturación, cavidades kársticas o fallas de diferentes escalas, puede dar lugar a una permeabilidad secundaria.

En algunas de las aplicaciones la existencia de esta permeabilidad es el efecto deseado, mientras que en otras representa la circunstancia cuya ausencia se intenta comprobar. Entre las primeras se encuentra el caso de la ingeniería de yacimientos en explotaciones petrolíferas, donde una pequeña variación en el valor de los parámetros de porosidad, permeabilidad y recuperación del yacimiento pueden determinar la explotabilidad de éste (Damsleth, E. et al., 1992). De igual manera cuando se estudia la explotación de acuíferos.

En los estudios medioambientales de vertederos es también importante conocer su relación con acuíferos presentes y las posibilidades de contaminación.

En el caso de los residuos radiactivos de alta actividad, constituidos fundamentalmente por el combustible gastado procedente de las centrales y por los residuos vitrificados procedentes del reproceso del combustible gastado, la seguridad es el parámetro dominante en la decisión del emplazamiento final del almacenamiento de residuos radiactivos. En todo estudio de seguridad se evalúa la probabilidad de migración de los radionucleidos a la Biosfera (Balbás, M.J.; 1996).

Generalmente los grandes volúmenes de roca, impermeable en principio, como puede ser el caso de formaciones graníticas, contienen numerosas fracturas generadas por deformaciones geológicas, enfriamientos magmáticos diferenciados, e incluso por la propia construcción del almacenamiento, que pueden estar conectadas entre sí formando una red de canales, a través de los cuales puede circular el flujo acuoso.

(\*) E. T. S. de Ingenieros de Minas (U. P. M.).

La conductividad hidráulica de cada una de las fracturas y su interconexión determinan la conductividad hidráulica o permeabilidad efectiva del macizo geológico.

2. LOS MODELOS MEDIANTE PROCESOS DE POISSON

Con el fin de simular la geometría de las fracturas se utilizan diversos tipos de modelos (Stoyan, D. et al., 1987, 1994). Entre ellos vamos a considerar los booleanos de gérmenes y granos (Molchanov, I.S.; 1993), y en particular los poissonianos de gérmenes y granos planos, que simulan las fracturas mediante cuerpos planos, discos, con centros situados en ciertos puntos del espacio, es decir, en los gérmenes; con orientaciones variables del plano que los contiene, y por último, con tamaños, radios, todo ello según determinadas distribuciones aleatorias.

El modelo se construye situando cada heterogeneidad en un punto, en su centro estimado. Por ello, debe comenzarse ubicando puntos en el espacio. El método que se sigue recibe el nombre de *procesos de puntos de Poisson*.

Los procesos de Poisson estacionarios se caracterizan porque :

- son estables; generan un número medio de puntos  $\lambda$  por unidad de volumen constante
- los puntos se generan aleatoriamente de forma independiente, es decir, conocer el número de puntos en un dominio no ayuda a predecir el número de puntos en el siguiente

Una vez situados los puntos en el espacio, se procede a dibujar discos con sus centros en cada uno de ellos, que serán los elementos geométricos que simulen las fracturas. Para proceder a esta representación es necesario establecer una orientación para el plano de cada uno de los discos, o lo que es igual, una dirección para la normal al plano en el que está contenido. La asignación de las direcciones se hace aleatoriamente siguiendo una cierta distribución en la esfera.

Entre estas distribuciones las más usuales son la uniforme, la de Fisher y la de Watson (Mardia,

K.V., 1972; Fisher, N.I., 1987). Cuando tienen carácter vectorial los datos, es decir, cada dirección tiene un sentido elegido en ella, la distribución más habitual es la de Fisher. Esta distribución juega un papel análogo en la esfera al que cumple la distribución normal en la recta. La distribución tiene una dirección modal y en torno a ella presenta simetría rotacional. Cuando los datos direccionales no son vectoriales, es decir, no existe un sentido preferente en la dirección, la distribución más habitual es la de Watson.

El valor del radio asignado a cada disco sigue a su vez una cierta distribución en la recta que en la práctica se elige entre la lognormal, la uniforme o la exponencial.

El modelo descrito puede ampliarse si se modifica la configuración de puntos de forma tal que su densidad fluctúe espacialmente (Cressie, N.A.C.; 1991). Es lo que se denomina un proceso de Poisson general.

3. LOS PROCESOS DE GIBBS

Puede ocurrir que las condiciones geológicas establezcan ciertas condiciones para las distancias entre los centros de las fracturas. Ello se traducirá en la transformación del proceso de puntos de Poisson inicial en otro tipo de procesos. En general estos se suelen caracterizar por los momentos de segundo orden.

Entre ellos los procesos de Gibbs, que están inspirados en las ideas de la mecánica estadística. Josiah W. Gibbs fue uno de sus fundadores, junto con L.Boltzmann y J.C.Maxwell. Lo esencial de su pensamiento establece un puente entre la descripción macroscópica de un sistema y su constitución microscópica. Los valores observados macroscópicamente son fruto de la ordenación e interacción de sus partículas constitutivas. Dado el alto número de éstas es imposible, e innecesario también, considerar el estado dinámico de cada una de ellas en particular, para obtener la descripción macroscópica del sistema. Para realizar un análisis desde el punto de vista estadístico, ha de hacerse una estimación razonable acerca de la dinámica de cada partícula, mediante la probabilidad de distribución de las partículas entre los diversos estados en que pueden encontrarse.

La energía de un sistema, por ejemplo, es la suma de las energías individuales de todas y cada una de las partículas. Pero existen muchas posibles soluciones (particiones) de distribución de las energías de cada partícula compatibles con un valor de su suma, es decir, con la energía total del sistema. Para cada estado macroscópico del sistema hay una partición más probable que cualquier otra. En grandes sistemas de partículas se logra el equilibrio del sistema cuando éste alcanza la partición más probable.

En una cierta configuración  $\phi$  de un sistema formado por  $n$  partículas, la densidad de probabilidad es función de los potenciales y puede expresarse como:

$$f(\phi) = \frac{e^{-U(\phi)}}{Z} = \frac{e^{-U(x_1, x_2, \dots, x_n)}}{Z}$$

donde  $Z$  es la función de partición y  $U$  es la denominada función de energía o potencial multipartícula. Esta última función puede tomar la expresión de un potencial de interacción en la forma de suma de pares de potenciales:

$$U(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_i \sum_j \theta(\|x_i - x_j\|)$$

La función  $\theta$  se denomina potencial de par. Pueden estimarse diferentes expresiones para este potencial para su uso en los procesos de Gibbs. En el modelo realizado por los autores se ha tomado la expresión debida a Saunders, dada por:

$$\theta_{h,b,R} = \begin{cases} \infty & \text{si } r \leq h \\ -b & \text{si } h < r \leq R \\ 0 & \text{si } r > R \end{cases}$$

Según este modelo, la distancia interpuntual  $r$  no debe ser menor que  $h$  puesto que al ser en ese caso  $\theta = \infty$ , el potencial o energía  $U$  sería infinito y la densidad de distribución  $f$  sería nula.

Este modelo favorece el que existan puntos con distancias entre sí comprendidas entre  $h$  y  $R$  y

que no existan, por el contrario, parejas de puntos con distancia entre ellos menor que  $h$ .

El parámetro  $R$  representaría el radio de influencia, más allá del cual la influencia de los demás puntos sobre un punto determinado cualquiera es despreciable.

La ventaja que se puede obtener con los desarrollos de puntos de Gibbs, para ubicar las fracturas o heterogeneidades, es poder obtener agrupaciones según diversos criterios, estableciendo así zonas de mayor o menor densidad de fracturación, lo que hará que la simulación realizada se asemeje en mayor grado a la realidad que presenta la naturaleza.

4. SIMULACION DE UN PROCESO DE GIBBS: PROCESOS DE MARKOV Y MÉTODO DE RECHAZO

Para simular el modelo de Gibbs se ha seguido un proceso de modificación de la distribución previa de puntos generados con el proceso de Poisson, mediante procesos de Markov y estableciendo un método que crea un criterio de rechazo, como se verá a continuación.

El objetivo es obtener una secuencia de configuraciones de puntos cuya distribución estacionaria responda a la propuesta por el modelo de Gibbs.

En cada transición se selecciona bien aleatoria bien sistemáticamente un punto del proceso. Se elimina este punto y condicionado al resto de puntos se simula un nuevo punto. Para esto último se sigue un método de rechazo consistente en la obtención de un punto al azar y su aceptación o rechazo según que la densidad condicional para ese punto sea mayor o menor que  $x$  veces el mayor valor, que dada la configuración de los  $n-1$  puntos, pueda alcanzar esta densidad condicional, siendo  $x$  un número equiprobable entre 0 y 1. En caso de rechazo se simulará un nuevo punto.

Dado que se ha tomado la expresión de Saunders para el potencial de par, llamaremos  $c = \exp(b)$  y partiremos de una simulación de Poisson de la que se habrá eliminado todo par de puntos distantes entre sí menos de  $h$ , y simulado otros nuevos hasta obtener  $n$  puntos.

A continuación el procedimiento será:

- 1) Selección de un punto (al azar o sistemáticamente) y eliminación.
- 2) Obtención de un punto al azar que diste más de  $h$  de cualquiera de los  $n-1$  puntos.
- 3) Determinación del número  $g$  de entre los  $n-1$  que distan menos de  $R$  del nuevo punto.
- 4) Determinación del cociente  $z = c^g / c^{n-1}$
- 5) Obtención de un número equiprobable  $x$  entre 0 y 1.
- 6) Si  $z > x \rightarrow$  se retiene el punto y se vuelve al punto 1.  
Si  $z < x \rightarrow$  se elimina el punto y se vuelve al punto 2.

De acuerdo con Ripley, una vez iniciado el procedimiento, cada  $4n$  transiciones se obtienen realizaciones de Gibbs independientes (Ripley, B.D.; 1972 y 1979).

## 5. EJEMPLO DE SIMULACION

Con los programas desarrollados se pueden simular los modelos. En las figuras siguientes se incluye un modelo obtenido para 60 discos. La fig.1 muestra el conjunto de discos generados.

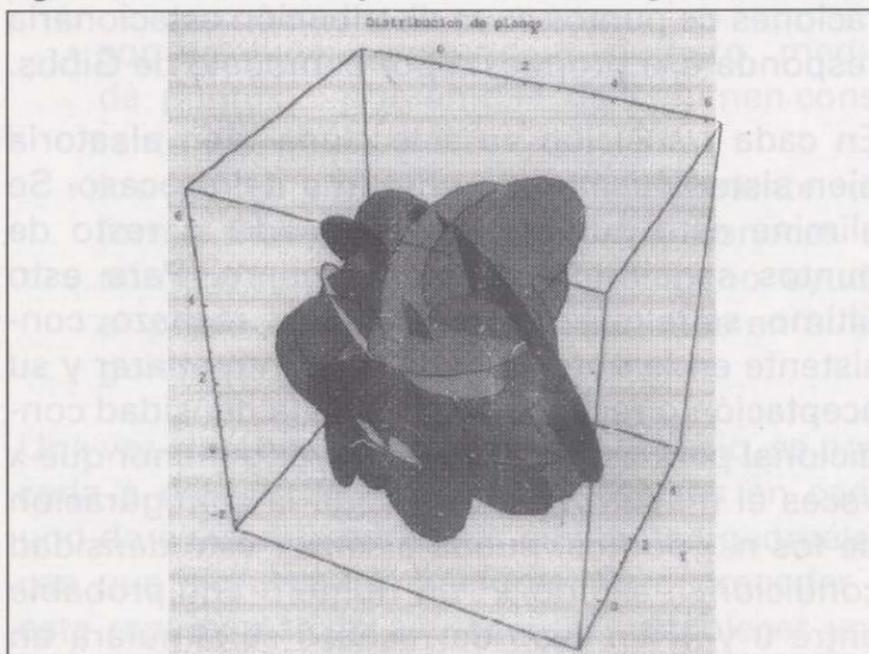


Fig. 1

En la fig. 2 se presenta la zona central del volumen simulado convenientemente ampliada.

En las fig. 3 y 4 se muestran los cortes horizontales dados al modelo a un 40 % y a un 60 % de su

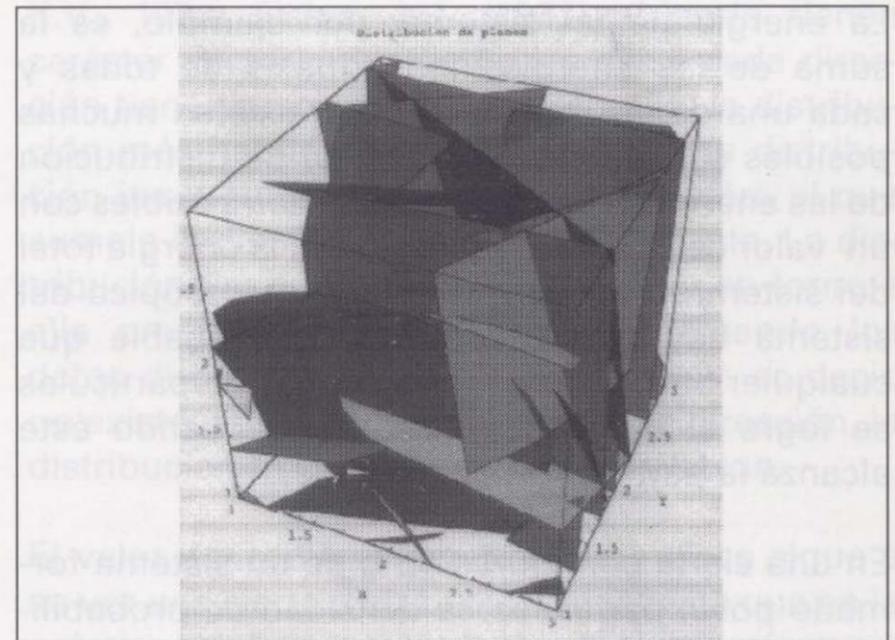


Fig. 2

altura respectivamente, dibujándose las trazas de los discos con los correspondientes planos horizontales.

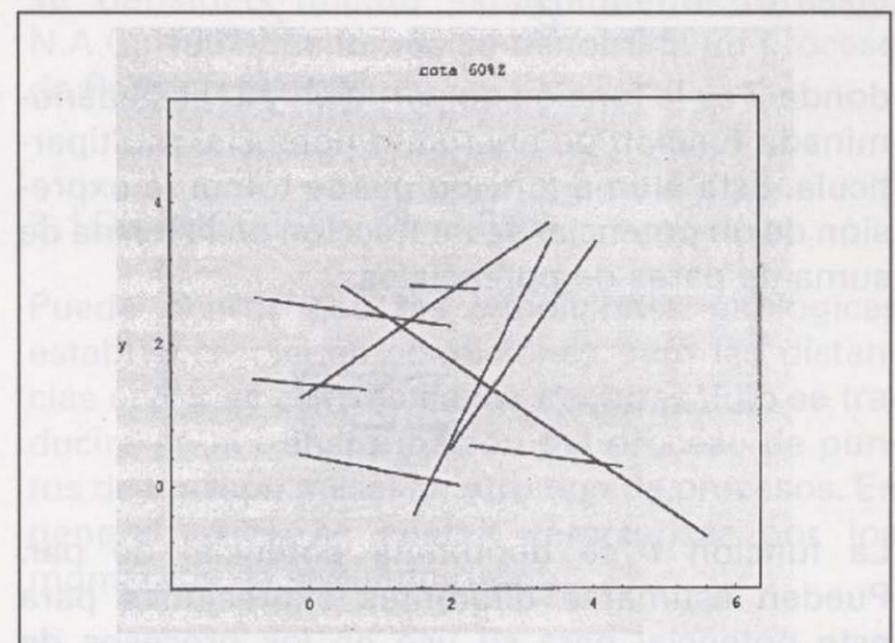


Fig. 3

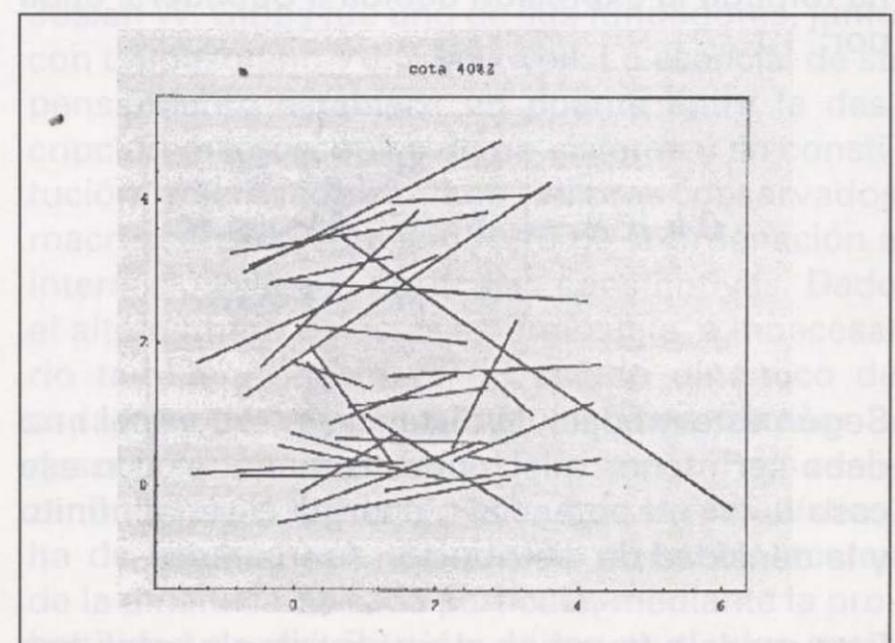


Fig. 4

A continuación el procedimiento será:

- 1) Selección de un punto (al azar o sistemáticamente) y eliminación.
- 2) Obtención de un punto al azar que diste más de  $h$  de cualquiera de los  $n-1$  puntos.
- 3) Determinación del número  $g$  de entre los  $n-1$  que distan menos de  $R$  del nuevo punto.
- 4) Determinación del cociente  $z = c^g / c^{n-1}$
- 5) Obtención de un número equiprobable  $x$  entre 0 y 1.
- 6) Si  $z > x \rightarrow$  se retiene el punto y se vuelve al punto 1.  
Si  $z < x \rightarrow$  se elimina el punto y se vuelve al punto 2.

De acuerdo con Ripley, una vez iniciado el procedimiento, cada  $4n$  transiciones se obtienen realizaciones de Gibbs independientes (Ripley, B.D.; 1972 y 1979).

## 5. EJEMPLO DE SIMULACION

Con los programas desarrollados se pueden simular los modelos. En las figuras siguientes se incluye un modelo obtenido para 60 discos. La fig.1 muestra el conjunto de discos generados.

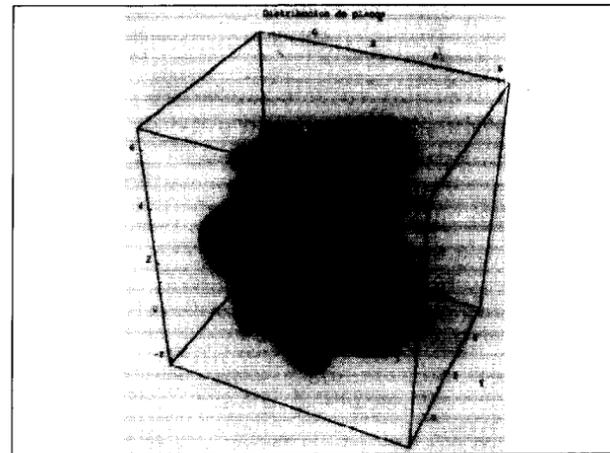


Fig. 1

En la fig. 2 se presenta la zona central del volumen simulado convenientemente ampliada.

En las fig. 3 y 4 se muestran los cortes horizontales dados al modelo a un 40 % y a un 60 % de su

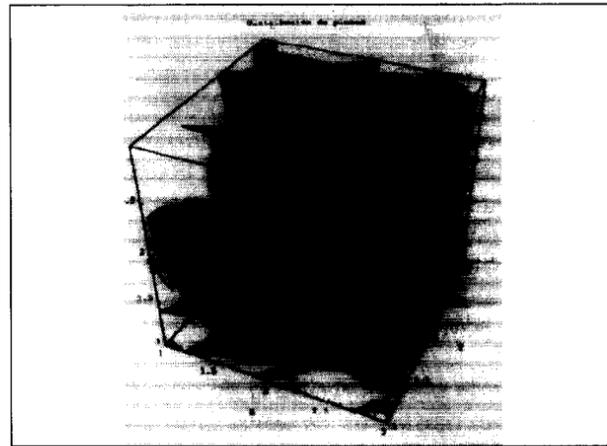


Fig. 2

altura respectivamente, dibujándose las trazas de los discos con los correspondientes planos horizontales.

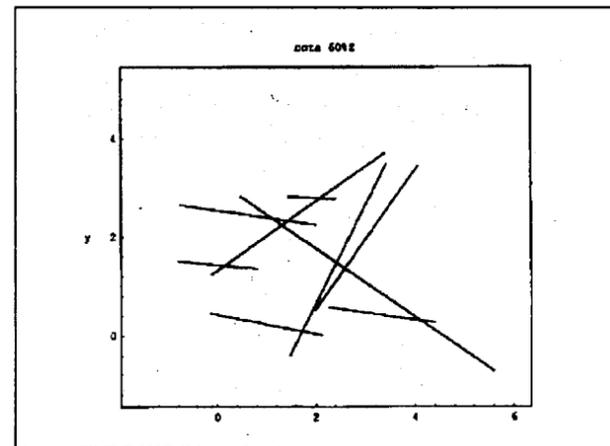


Fig. 3

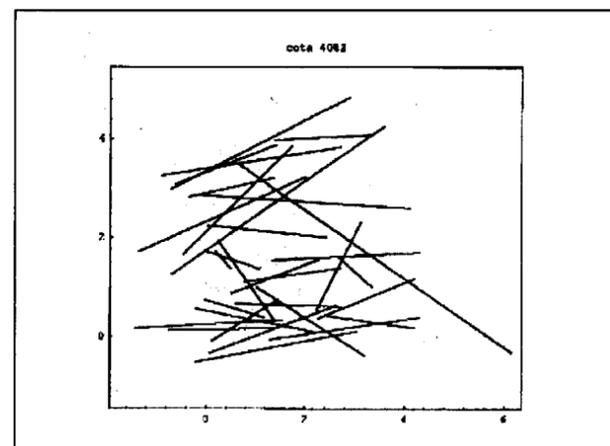


Fig. 4

## REFERENCIAS

- BALBAS, M.J. *Simulación de la Heterogeneidad del Medio Geológico Fracturado*. Proyecto fin de carrera. 1996.
- CRESSIE, N.A.C. *Statistics for spatial Data*. Wiley. 1991.
- DAMSLETH, E., TJØLSEN, C.B., OMRE, H., HALORSEN, H.H. *A two-stage stochastic model applied to a North Sea reservoir*. Soc. Petroleum Engineering. Abril 1992.
- FISHER, N.I., LEWIS, T., EMBLETON, B.J.J. *Statistical analysis of spherical data*. Cambridge University Press. 1987.
- MARDIA, K.V. *Statistics of directional data*. A. P. 1972.
- MOLCHANOV, I.S. *Statistics of the boolean model: from the*

*estimation of means to the estimation of distributions*. 6th International Workshop on Stochastics, Geometry, Stereology and image analysis. Valencia. 1993.

RIPLEY, B.D. *Modelling spatial patterns*. Journal of the Royal Statistical Soc.1972. B-39. pag 172-212.

RIPLEY, B.D. *Simulating spatial patterns: dependent samples from a multivariate density*. Applied Statistics. 1979. Vol 28. pag 109-112.

STOYAN, D., KENDALL, W.S., MECKE, J. *Stochastic geometry and its applications*. Wiley. 1987.

STOYAN, D., STOYAN, H. *Fractals, random shapes and point fields*. Methods of geometrical statistics. Wiley. 1994.

Original recibido: Enero 1997.

Original aceptado: Abril 1997.

## SINTESIS DE BERILO DOPADO CON CROMO, A PARTIR DE BERILO NATURAL DE ORIGEN ESPAÑOL.

Por J. S. COZAR (\*), A. IBARRA (\*\*) y A. PEREZ (\*\*\*)

### R E S U M E N

Se ha realizado un ensayo previo de síntesis de berilo por el método de flux. Para ello se ha utilizado un horno tubular vertical y crisoles de platino.

Una mezcla de berilo natural, óxido de vanadio y cromato de plomo, fué calentada a 1100 °C. Al cabo de 24 horas se inició un enfriamiento lento a razón de 5 °C/hora. Después de 60 horas y habiendo descendido la temperatura hasta 800 °C, se dejó enfriar libremente.

Una vez atacada la masa resultante quedaron liberados abundantes cristales transparentes hexagonales de berilo, de color verde esmeralda y tamaño comprendido entre 0.1 y 0.5 mm. Estos cristales estaban acompañados de abundantes cristales prismáticos incoloros de fenaquita y mostraban un recubrimiento parcial o total de tridimita.

Los cristales de berilo mostraban contenidos variables de óxido de cromo comprendidos entre el 1 y el 3 %.

*Palabras clave:* Crecimiento cristalino, Berilo sintético.

### A B S T R A C T

Preliminary experiments for the growth of synthetic beryl has been made using the flux method. Platinum crucibles and a tubular oven were used.

A mixture of natural beryl, vanadium oxide and lead chromate were heated up to 1100 °C. After 24 hours a 5°C/hour cooling started during 60 hours. At a temperature around 800 °C the mixture was free cooled.

From the obtained result was extracted a lot of exagonal transparent single crystals of beryl, green-emerald coloured and with size between 0.1 and 0.5 mm. Besides these crystals, it was obtained also colourless single crystals of phenakite. Both crystal types showed a partial coating with tridymite.

The beryl single crystals had a chromium contents between 1 and 3 %.

*Key words:* Crystals growth, Synthetic beryl.

### 1. INTRODUCCION

El berilo es el mineral de berilio más abundante en las pegmatitas graníticas, aunque también se encuentra en rocas metamórficas y en yaci-

mientos de origen hidrotermal. Su fórmula ideal es  $3\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$  ó  $\text{Al}_2\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})$ .

La estructura del berilo está constituida por un ciclosilicato complejo en el que los átomos de silicio ocupan los centros de grupos de cuatro átomos de oxígeno situados en los vértices de tetraedros. Estos grupos tetraédricos están unidos entre sí por compartición de átomos de oxígeno formando anillos que tienen la composición  $\text{Si}_6\text{O}_{18}$ . Los anillos se unen entre sí por átomos de aluminio situados en el centro de grupos de seis

(\*) Instituto Gemológico Español. C/ Víctor Hugo, 1. Madrid 28004.

(\*\*) Instituto de Investigación Básica. CIEMAT. Avda. Complutense, 22. Madrid 28040.

(\*\*\*) Departamento de Ingeniería Geológica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. C/ Ríos Rosas, 21. Madrid 28003.

átomos de oxígeno y por átomos de berilio en un grupo similar de cuatro átomos de oxígeno.

Dixagonal bipiramidal, los cristales son generalmente prismáticos, alargados, de seis caras.

La presencia de átomos extraños de ciertos elementos, sustituyentes en la estructura del berilo, le confieren propiedades especiales que tienen aplicación en las altas tecnologías y en el mundo comercial de las gemas. Por ejemplo, se ha demostrado que el berilo natural conteniendo  $\text{Cr}^{3+}$  tiene gran utilidad aplicado en dispositivos de microondas [1]. Goodwin [2] ha demostrado la acción maser en berilo sintético dopado con  $\text{Cr}^{3+}$ . Por otra parte, este mismo tipo de berilo constituye la variedad conocida como "esmeralda", que es una de las piedras preciosas de más alta cotización en nuestros días.

Las investigaciones encaminadas hacia el logro de la síntesis del berilo dopado se han visto polarizadas fundamentalmente hacia esta variedad. Esto resulta bastante lógico si se tiene en cuenta la importante repercusión económica que representa en el campo de la gemología. Por la misma razón la información científica al respecto se ha visto bastante restringida, limitándose a la proporcionada por algunos investigadores dedicados a la búsqueda de materiales aplicados a la generación de microondas [3,4,5,6]. El resto de la información proporcionada por las firmas comerciales y por investigadores en el campo de la gemología aporta fundamentalmente datos sobre las características gemológicas y de diferenciación de los materiales obtenidos, pero es muy pobre en todo lo relativo a los procesos de síntesis seguidos.

En general, se conocen varios tipos de procesos para el crecimiento de grandes cristales: fusión, hidrotermal y flux.

El primero (Verneuil o de fusión a la llama y Czochralski o de cristalización a partir de un fundido) presentan desventajas para el crecimiento de grandes cristales de sistemas complejos como el berilo. Los grandes gradientes térmicos que son inherentes a estos procesos tienden a inducir tensiones mecánicas, sobre todo en cristales de gran tamaño.

El segundo tipo, permite obtener monocristales de berilo por medio de una solución acuosa a altas presiones y temperaturas. Sin embargo, el recrecimiento de los cristales obliga a mantener las condiciones del proceso durante largos periodos de tiempo, con los inconvenientes que plantea el trabajar a altas presiones y temperaturas.

El tipo flux se basa en la utilización de mezclas de los óxidos componentes del berilo con distintos compuestos de bajo punto de fusión (polimolibdatos de metales alcalinos, óxido de plomo, ácido bórico, wolframatos de metales alcalinos, molibdato y wolframato de plomo, óxido de vanadio, etc). A partir de esta mezcla fundida cristaliza el berilo sintético a presión normal.

Para el presente trabajo se ha elegido el método flux por ser considerado el más adecuado para el crecimiento de cristales con estructura de tipo berilo y que permite controlar de forma más satisfactoria la incorporación de elementos dopantes. Para ello se han seguido los pasos de Linares et al [5] en la utilización del óxido de vanadio, ya que este compuesto es muy poco volátil y amplía la zona de estabilidad del berilo.

## 2. MATERIALES Y METODOS

Para la mezcla se han utilizado los siguientes productos:

- $\text{V}_2\text{O}_5$  extra puro de la casa Merck
- $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Pb químicamente puro de la casa Probus
- Berilo natural procedente de la cantera Puentemocha en Pereña (Salamanca). El berilo fué molido hasta 200 mallas y seguidamente calcinado a 800 °C durante 6 horas.

La mezcla utilizada fué:  $\text{V}_2\text{O}_5$  (70%),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Pb (2%), berilo calcinado (28%).

De acuerdo con la revisión bibliográfica previamente mencionada, el ciclo térmico necesario para la obtención de berilo sintético consta de dos fases fundamentales. La primera, en la que se realiza la disolución y mezcla de los distintos compuestos, requiere el calentamiento de la mezcla de polvos a temperaturas entre 1000 y

1300 °C durante decenas de horas. La segunda en la que mediante un enfriamiento lento (entre 1 y 10 °C/hora) y controlado de la mezcla, se produce la nucleación y crecimiento de las distintas fases cristalinas. Teniendo esto en cuenta, junto con las limitaciones de los equipos disponibles, se decidió que la temperatura de la primera fase fuera 1100 °C y la fase de enfriamiento se realizara a una velocidad de 5 °C/hora. Una vez finalizada la segunda fase de ciclo térmico (alrededor de 800 °C), se dejó enfriar el crisol libremente. El ciclo térmico completo se muestra en la figura 1.

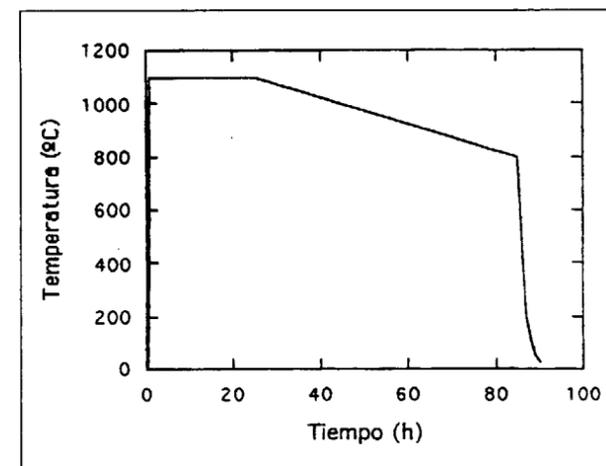


Figura 1. Ciclo térmico utilizado en los experimentos descritos en este trabajo.

Se llevaron a cabo dos experimentos en los que se aplicó el citado ciclo térmico. Debido a problemas experimentales, en el primero de ellos se produjo un enfriamiento brusco del horno y un posterior calentamiento, sin que se observaran entre ellos diferencias notables en el resultado final.

Se utilizó un horno tubular de resistencia de 30 mm de diámetro interno y 16 cm de altura. Permite alcanzar una temperatura máxima de 1300 °C, siendo la temperatura de trabajo de 1200 °C.

El control de la temperatura se realizó mediante un termopar de platino, que tiene una sensibilidad del orden de 40  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , y un controlador de temperatura de la marca SETARAM mod. RT3000, que permite el control de cambios en la temperatura entre 10  $\mu\text{V}/\text{hora}$  y 99  $\mu\text{V}/\text{min}$ .

La mezcla de partida se introdujo en crisoles de platino de pequeño tamaño (30 mm de diámetro, 33 mm de altura, 15 ml de capacidad). Los crisoles permanecían en el centro del horno apoyados en un soporte cerámico. La posición relativa del horno y el crisol era regulable (ver figura 2). Para fijar esta posición se realizaron toda una serie de medidas con distintas posiciones relativas y se midió la diferencia de temperaturas entre la parte superior e inferior del crisol sin carga. Se seleccionó la posición en la que esta diferencia es mínima (20 °C a 1200 °C).

Asimismo, durante el calentamiento se midió la temperatura en distintas zonas del crisol con objeto de controlar la presencia de gradientes térmicos. Estas medidas se realizaron utilizando distintos tipos de termopar (cromel-alumel en el primer calentamiento y platino-rodio en el segundo). Los máximos gradientes observados fueron también de 20 °C entre la parte superior y la inferior del crisol, indicando que la carga no induce modificaciones en la distribución de temperaturas del horno.

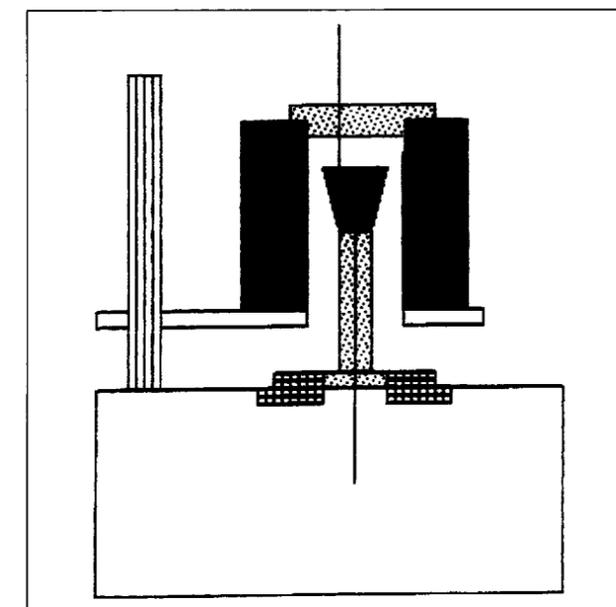


Figura 2. Diagrama del horno utilizado.

La masa obtenida en el crisol presenta el aspecto de un compuesto opaco, de color marrón, reflectante, fibrosolaminal, que engloba gran cantidad de pequeños cristales, euhédricos, transparentes, unos verdes y otros incoloros (figura 3).



Figura 3. Mezcla sólida obtenida en los crisoles a la finalización del ciclo térmico, detalle observado con MEB.

Esta masa fue sometida a la acción del NaOH 10 molar. De este modo se consiguió disolver el  $V_2O_5$  quedando liberados los cristales de silicatos.

Por último se llevó a cabo una separación, por pesos específicos, de los silicatos liberados en la operación anterior, mediante la utilización de bromoformo (densidad 2.88). De este modo se obtuvieron dos fases transparentes: una de color verde de peso específico  $< 2.88$  y otra incolora de peso específico  $> 2.88$ . A continuación ambas fases cristalinas fueron sometidas a una revisión en la lupa binocular con el objeto de separar, en lo posible, los agregados mixtos.

Cada fase cristalina fue estudiada utilizando las siguientes técnicas:

- Microscopía óptica
- Microscopía electrónica de barrido (MEB)
- Microanálisis de rayos X (EDX), y
- Difracción de rayos X.

### 3. RESULTADOS

La fase cristalina de peso específico  $< 2.88$  está constituida por cristales de color verde esmeralda, transparentes, de tamaño comprendido entre 0.1 y 0.5 mm y cristalización hexagonal. Los

cristales son preferentemente prismáticos, de caras formadas por el prisma  $m$  ( $10\bar{1}0$ ) y la base  $c$  ( $0001$ ) (figura 4 A y B). Es frecuente la presencia del deutoprisma  $a$  ( $11\bar{2}0$ ) (figura 4C). Algunos son combinación del prisma  $m$  ( $10\bar{1}0$ ) predominante con la base  $c$  ( $0001$ ) y las pirámides  $p$  ( $10\bar{1}1$ ),  $s$  ( $11\bar{2}1$ ) y  $o$  ( $11\bar{2}2$ ) (figura 4D), tabulares según ( $10\bar{1}0$ ) y deformados (figuras 4E y F). Estos cristales presentan en general un núcleo saturado de inclusiones.

La fase cristalina de peso específico  $> 2.88$  está constituida por cristales incoloros, transparentes, de tamaño comprendido entre 0.1 y 0.7 mm en la dirección mayor. Cristalización trigonal. Los cristales son en general prismáticos, combinación de los prismas de primer y segundo orden  $m$  ( $10\bar{1}0$ ),  $a$  ( $11\bar{2}0$ ) y romboedro de tercer orden  $x$  ( $21\bar{3}2$ ) (figura 5A). La mayoría muy alargados en la dirección paralela a los prismas (figura 5 B y C). Estos cristales no presentan núcleo de inclusiones, en contraposición con lo observado en los anteriores de color verde.

Los cristales de ambas fases aparecen en general en forma aislada, sin embargo son frecuentes agregados (cluster) monofásicos de la fase de peso específico  $< 2.88$  y también se han observado algunos agregados con cristales de ambas fases (figura 6 A y B).

Es de destacar la presencia de una tercera fase, observada mediante MEB, que se manifiesta como cuerpos esféricos, fibrosoradiados, que recubren fundamentalmente, de manera total o parcial, los cristales de la fase verde (figuras 7 A a E y 8A) y en menor grado los cristales de la fase incolora (figura 7F). Los análisis puntuales por EDX realizados en algunos de estos esferulitos evidencian que se trata de  $SiO_2$  con algo de óxido de vanadio (figura 8B). En estos análisis se observa la presencia de los picos correspondientes a las radiaciones  $M\alpha$  y  $L\alpha$  del oro, debido a que los cristales fueron sombreados con dicho elemento, para su examen con el MEB.

En la Tabla I se muestran los datos de difracción de rayos X de cada una de las fases cristalinas, comparadas con las fichas ASTM. Estos datos identifican inequívocamente a la fase verde con el berilo y a la fase incolora con la fenaquita.

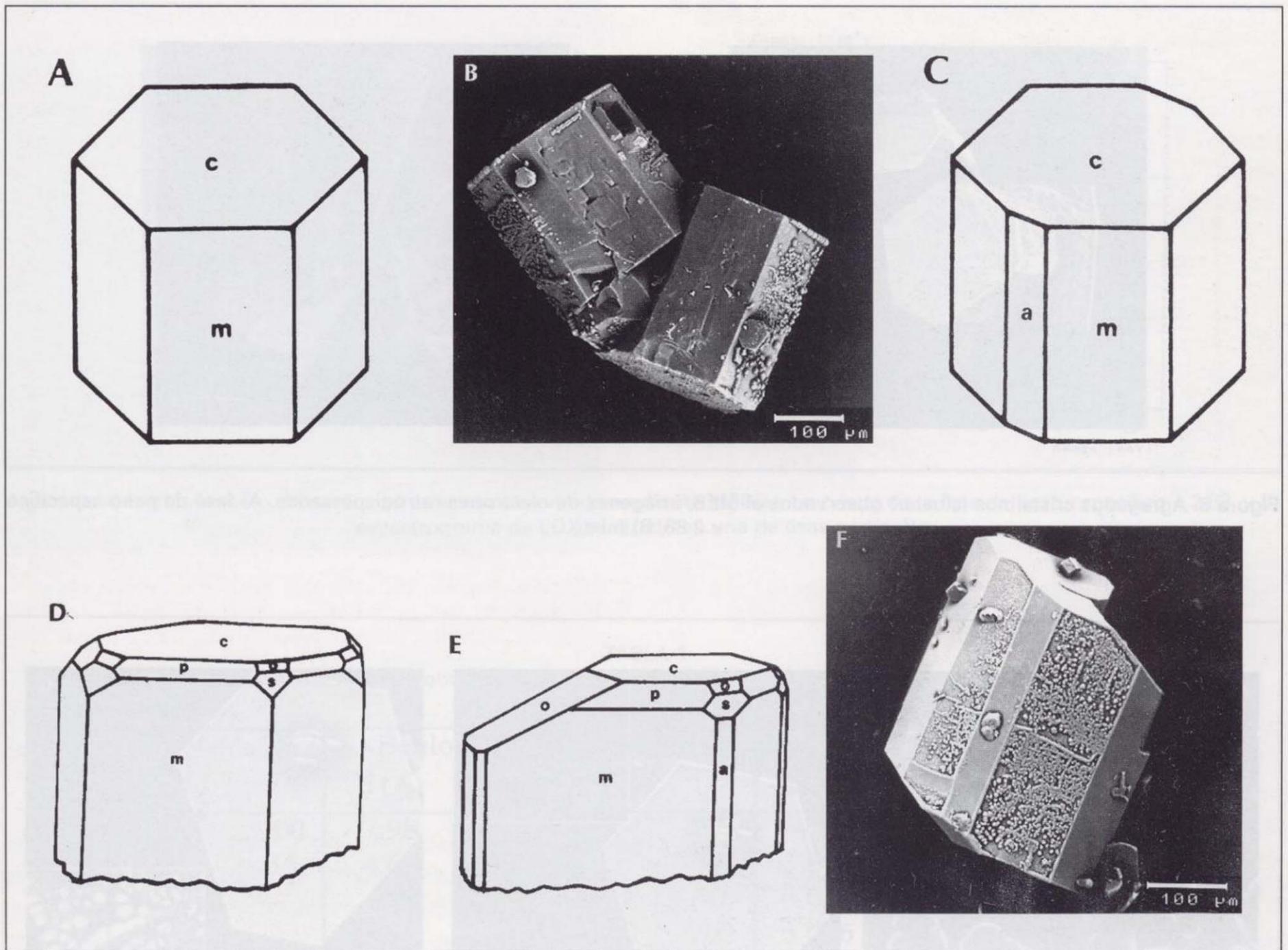


Figura 4. Morfologías de la fase cristalina de peso específico < 2.88. A, C, D y E modelos de las formas más abundantes. B y F aspectos al MEB, imágenes de electrones retrodispersados.

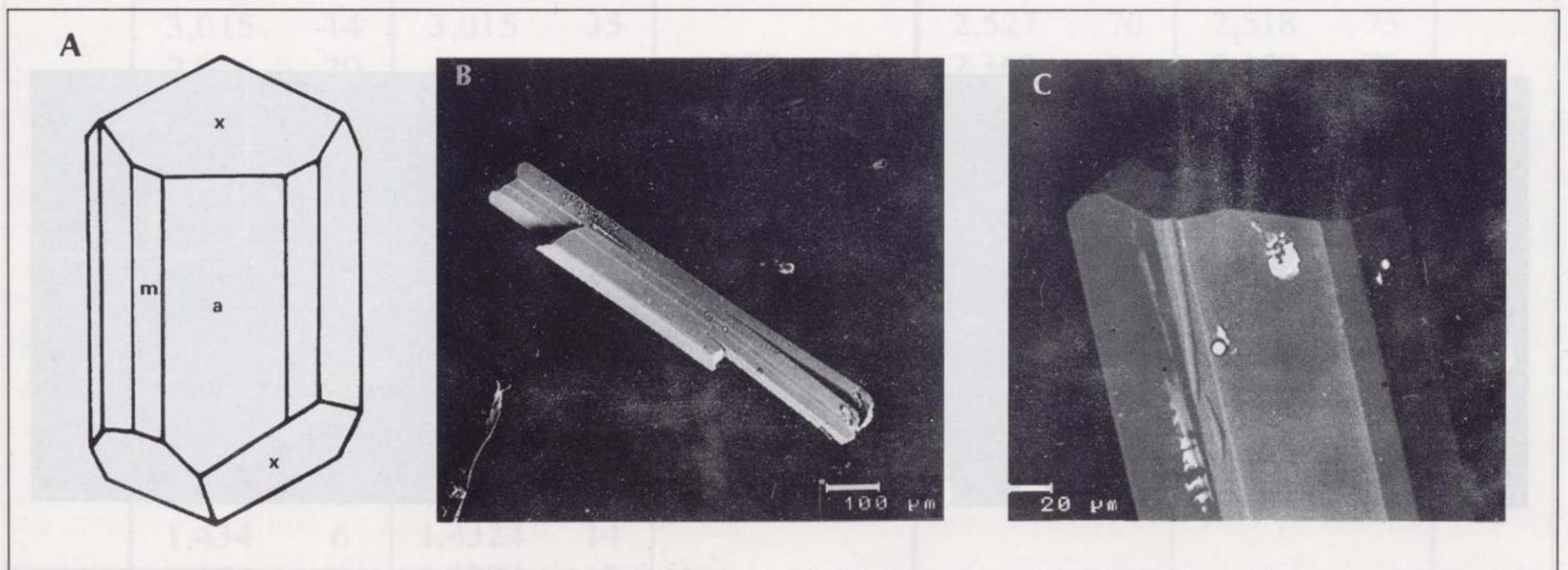


Figura 5. Morfologías de la fase cristalina de peso específico > 2.88. A) modelo de la forma predominante, B) y C) aspectos al MEB, imágenes de electrones retrodispersados.

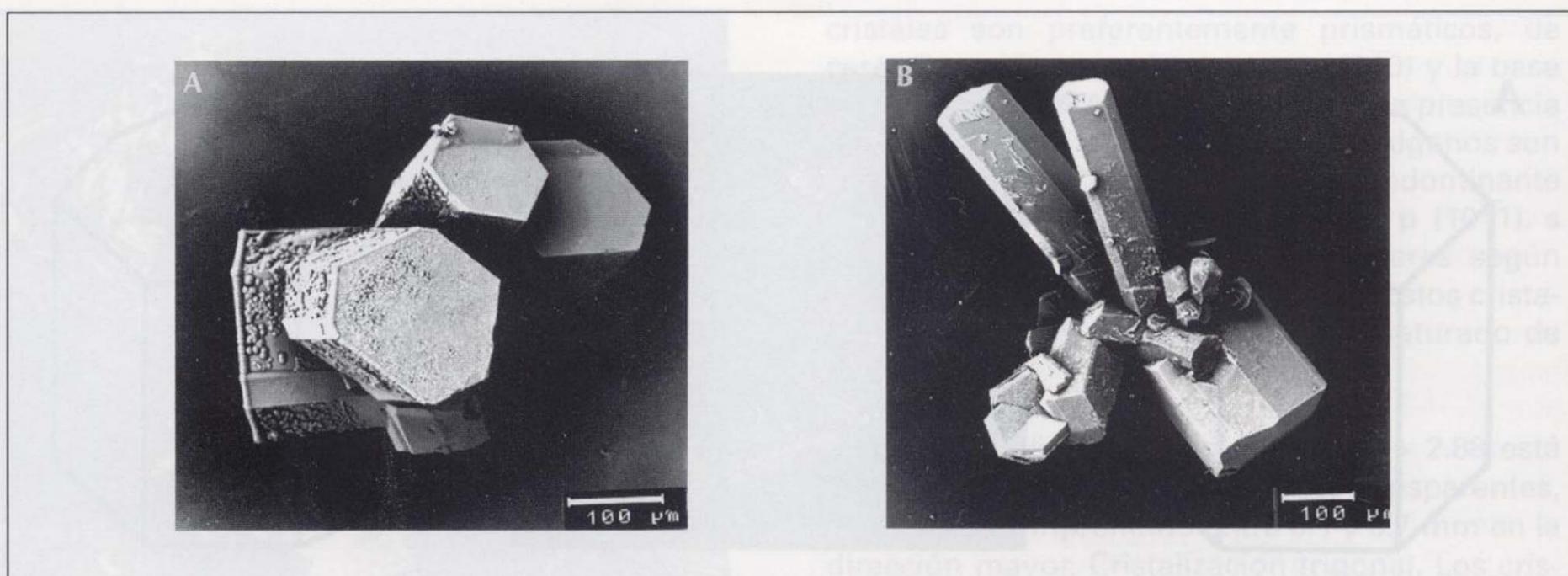


Figura 6. Agregados cristalinos (cluster) observados al MEB, imágenes de electrones retrodispersados. A) fase de peso específico < 2.88, B) mixto.

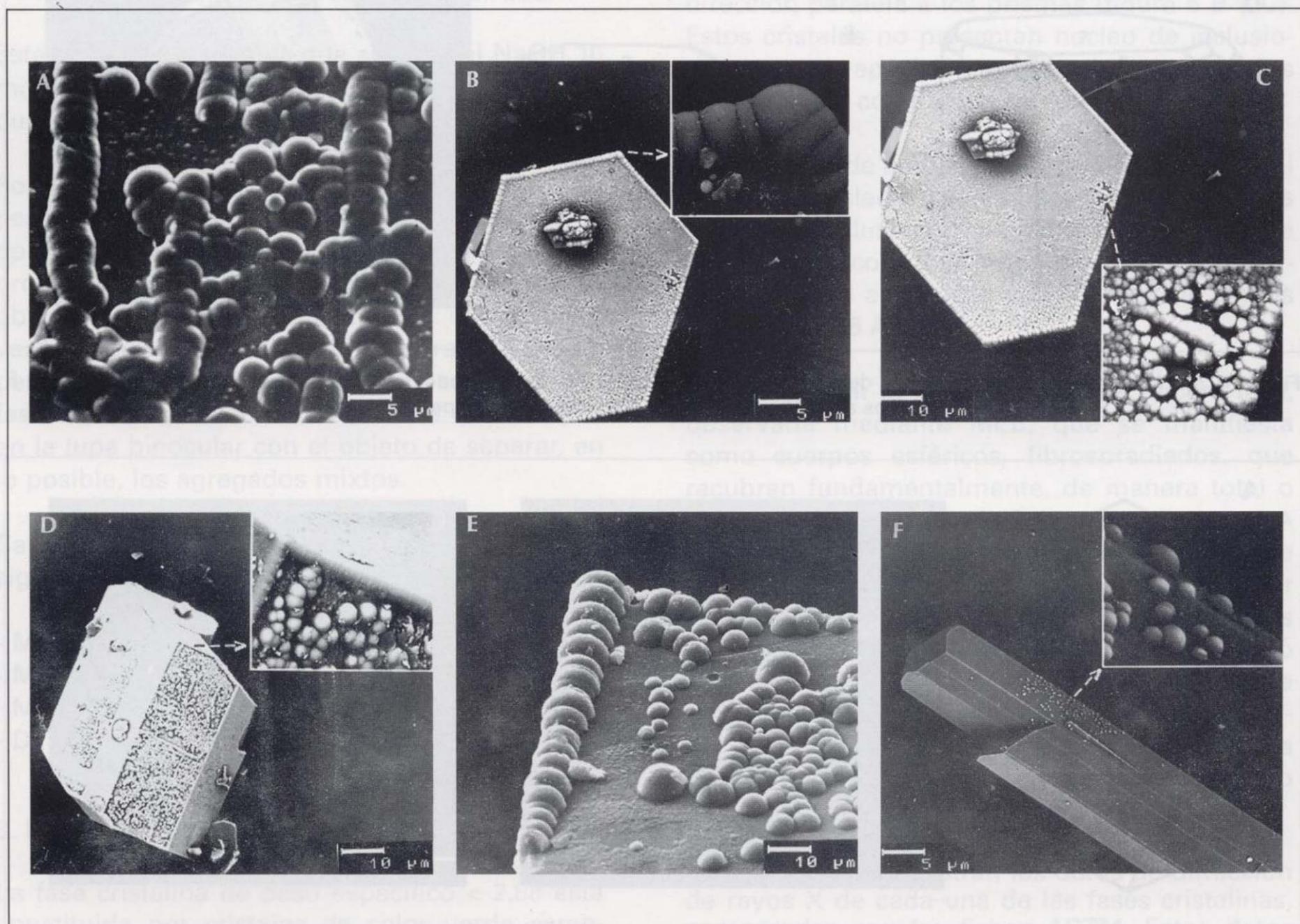


Figura 7. Recubrimientos de partículas esféricas observados mediante MEB, en cristales de la fase de peso específico < 2.88 (A), B), C), D), y E) y de la fase de peso específico > 2.88 (F).

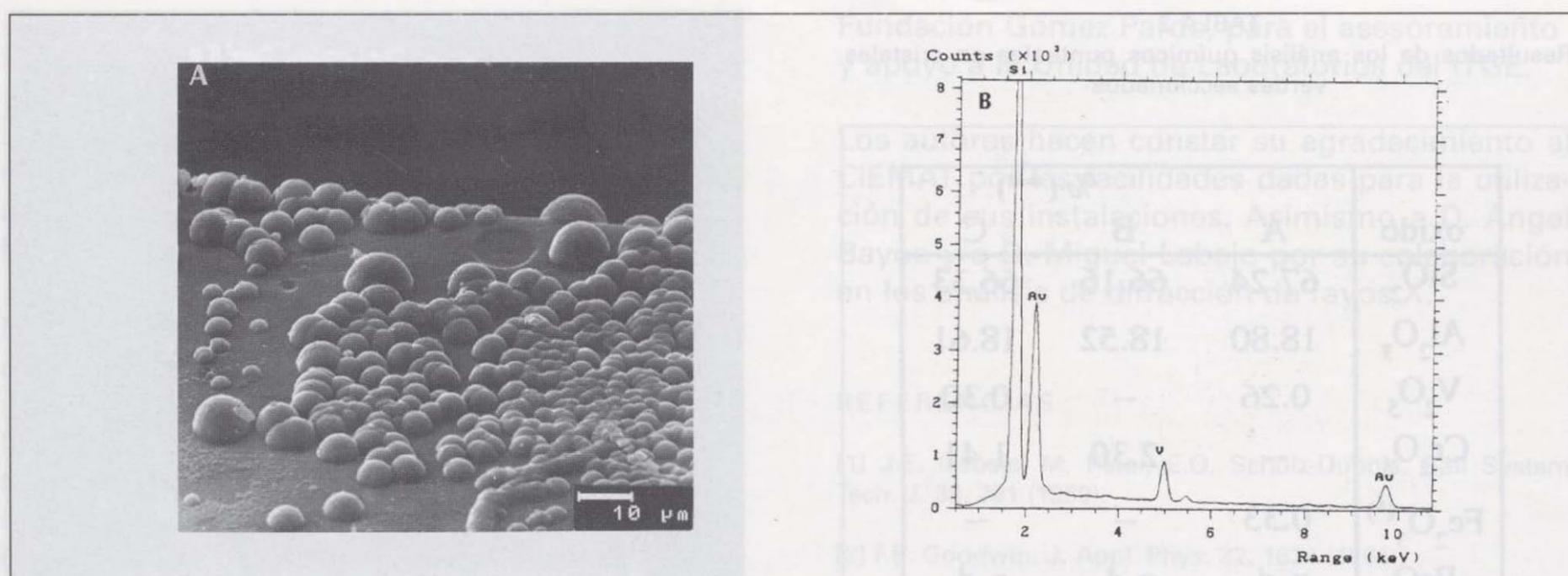


Figura 8. A) Recubrimiento de partículas esféricas observado mediante MEB en un cristal de la fase de peso específico < 2.88, y B) espectrograma de EDX realizado en una de esas partículas.

TABLA 1

Datos de difracción de rayos X, obtenidos de los cristales verdes e incoloros, comparados con la bibliografía.

Verde		Berilo (1)		Tridimita (2)		Incoloro		Fenaquita (3)	
d (Å)	I/I <sub>0</sub>	d (Å)	I/I <sub>0</sub>	d (Å)	I/I <sub>0</sub>	d (Å)	I/I <sub>0</sub>	d (Å)	I/I <sub>0</sub>
8,00	100	7,98	90			6,275	35	6,24	40
4,618	35	4,60	50			3,864	30	3,86	25
4,329				4,328	90	3,675	70	3,66	80
4,092				4,107	100	3,616	40	3,601	30
4,00	28	3,99	45			3,129	100	3,119	100
3,864	20			3,867	20	2,913	20	2,903	18
3,814	40			3,818	50	2,827	15	2,817	14
3,015	14	3,015	35			2,527	70	2,518	75
2,966	20			2,975	25	2,363	65	2,358	70
2,864	67	2,867	100			2,194	65	2,187	60
2,527	15	2,523	30			2,083	55	2,079	50
2,302	5	2,293	12						
2,154	6	2,152	16						
1,996	10	1,9926	20						
1,799	6	1,7954	18						
1,742	10	1,7397	20						
1,714	5	1,7110	14						
1,627	6	1,6265	18						
1,515	6	1,5138	16						
1,434	6	1,4324	14						
1,279	6	1,2774	12						

(1) A.S.T.M. 9/430 - (2) A.S.T.M. 18/1170 - (3) A.S.T.M. 9/431

TABLA 2

Resultados de los análisis químicos puntuales en cristales verdes seccionados

óxido	% (**)		
	A	B	C
SiO <sub>2</sub>	67.24	66.16	66.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.80	18.52	18.61
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.26	--	0.30
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--	2.30	1.41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (*)	0.33	--	--
BeO	n.d.	n.d.	n.d.
Total	86.63	86.98	86.65

A: núcleo

B: Zona interior próxima al núcleo

C: Zona interior próxima a la superficie

(\*) Fe Total - (\*\*) Media de tres análisis

n.d.: no determinado

Asimismo, en el difractograma del berilo se han observado cinco picos que corresponden a los espaciados principales de la tridimita que, teniendo en cuenta los análisis puntuales de rayos X (figura 8B), son relacionados con los esferulitos.

En la Tabla II se muestran los resultados de los análisis puntuales realizados en las distintas zonas de varias secciones de cristales de berilo (figura 9). Estos demuestran que el núcleo de los cristales no contiene cromo y contiene hierro. La zona próxima al núcleo presenta contenidos en cromo de hasta el 2.5 %, y en la zona próxima a la superficie este elemento es menos abundante, alrededor de 1.5 %.

El núcleo contiene abundantes inclusiones cristalinas que han sido identificadas por EDX como V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y SiO<sub>2</sub>.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han realizado unas pruebas preliminares en las que únicamente se ha pretendido y conseguido demostrar que es posible la nucleación de monocristales de berilo sintético

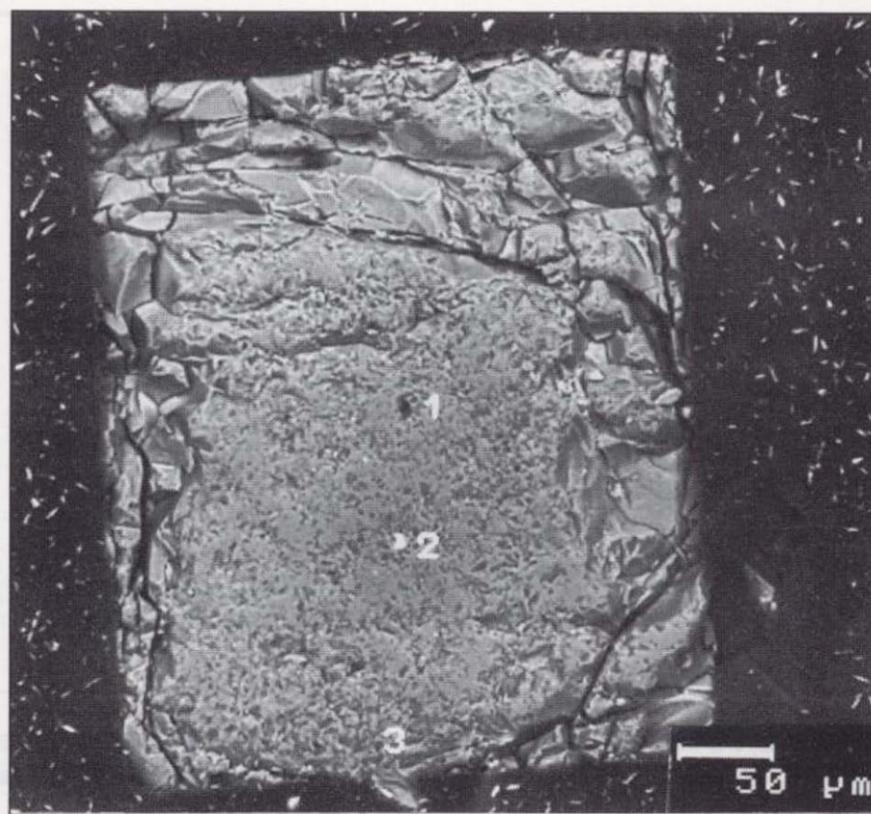


Figura 9. Sección de un cristal de la fase verde, observada mediante M.E.B., en la que están indicadas las zonas analizadas.

dopado con cromo a temperaturas del orden de 1100 °C utilizando polvo de berilo natural de origen español, cromato de plomo y óxido de vanadio.

A pesar de haber dedicado una mínima inversión (horno y crisoles muy pequeños, etc) y un tiempo mínimo de proceso (alrededor de 4 días), el tamaño de los cristales obtenidos es del orden de algunas décimas de milímetro y poseen un marcado color verde esmeralda. Simultáneamente, se obtiene una segunda fase cristalina que se ha determinado se trata de fenaquita.

Los resultados de los análisis efectuados permiten obtener conclusiones que sirven de orientación para el perfeccionamiento del proceso, a saber:

i) Las condiciones físico-químicas utilizadas en este ensayo permiten obtener un gran porcentaje de cristales idiomorfos de berilo con Cr.

ii) Sin embargo, también aparecen cristales idiomorfos de fenaquita, proto y singenética, así como fases polimorfas, de alta temperatura, del SiO<sub>2</sub>. Una de estas últimas aparece, protogenética, como inclusiones en el núcleo de los cristales de berilo. Otra, más abundante, epigenética,

TABLA 2  
Resultados de los análisis químicos puntuales en cristales verdes seccionados

óxido	% (**)		
	A	B	C
SiO <sub>2</sub>	67.24	66.16	66.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.80	18.52	18.61
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.26	--	0.30
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--	2.30	1.41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (*)	0.33	--	--
BeO	n.d.	n.d.	n.d.
<b>Total</b>	<b>86.63</b>	<b>86.98</b>	<b>86.65</b>

A: núcleo  
B: Zona interior próxima al núcleo  
C: Zona interior próxima a la superficie  
(\*) Fe Total - (\*\*) Media de tres análisis  
n.d.: no determinado

Asimismo, en el difractograma del berilo se han observado cinco picos que corresponden a los espaciados principales de la tridimita que, teniendo en cuenta los análisis puntuales de rayos X (figura 8B), son relacionados con los esferulitos.

En la Tabla II se muestran los resultados de los análisis puntuales realizados en las distintas zonas de varias secciones de cristales de berilo (figura 9). Estos demuestran que el núcleo de los cristales no contiene cromo y contiene hierro. La zona próxima al núcleo presenta contenidos en cromo de hasta el 2.5 %, y en la zona próxima a la superficie este elemento es menos abundante, alrededor de 1.5 %.

El núcleo contiene abundantes inclusiones cristalinas que han sido identificadas por EDX como V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y SiO<sub>2</sub>.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han realizado unas pruebas preliminares en las que únicamente se ha pretendido y conseguido demostrar que es posible la nucleación de monocristales de berilo sintético

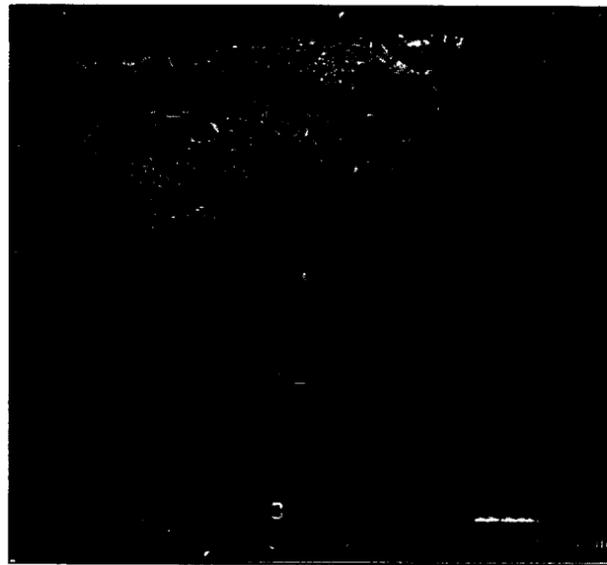


Figura 9. Sección de un cristal de la fase verde, observada mediante M.E.B., en la que están indicadas las zonas analizadas.

dopado con cromo a temperaturas del orden de 1100 °C utilizando polvo de berilo natural de origen español, cromato de plomo y óxido de vanadio.

A pesar de haber dedicado una mínima inversión (horno y crisoles muy pequeños, etc) y un tiempo mínimo de proceso (alrededor de 4 días), el tamaño de los cristales obtenidos es del orden de algunas décimas de milímetro y poseen un marcado color verde esmeralda. Simultáneamente, se obtiene una segunda fase cristalina que se ha determinado se trata de fenaquita.

Los resultados de los análisis efectuados permiten obtener conclusiones que sirven de orientación para el perfeccionamiento del proceso, a saber:

- i) Las condiciones físico-químicas utilizadas en este ensayo permiten obtener un gran porcentaje de cristales idiomorfos de berilo con Cr.
- ii) Sin embargo, también aparecen cristales idiomorfos de fenaquita, proto y singenética, así como fases polimorfas, de alta temperatura, del SiO<sub>2</sub>. Una de estas últimas aparece, protogenética, como inclusiones en el núcleo de los cristales de berilo. Otra, más abundante, epigenética,

es tridimita y recubre los cristales de berilo y fenaquita.

iii) Los cristales de berilo están constituidos por dos zonas perfectamente diferenciadas: un núcleo, sin cromo y una zona cortical con variable contenido en Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

iiii) la obtención de cristales mayores, con las características de la zona cortical próxima al núcleo, y la eliminación de las otras fases cristalinas, requiere la realización de una investigación sistemática y de mayor impacto económico. Sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que su realización tendría grandes posibilidades de éxito.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo, es uno de los contemplados dentro del acuerdo específico entre el ITGE y la

Fundación Gómez Pardo, para el asesoramiento y apoyo a la Unidad de Laboratorios del ITGE.

Los autores hacen constar su agradecimiento al CIEMAT por las facilidades dadas para la utilización de sus instalaciones. Asimismo a D. Angel Bayón y a D. Miguel Labajo por su colaboración en los análisis de difracción de rayos X.

#### REFERENCIAS

- [1] J.E. Geusic, M. Peter, E.O. Schulz-Dubois. Bell System Tech. J. 38, 291 (1959).
- [2] F.E. Goodwin. J. Appl. Phys. 32, 1624 (1961).
- [3] P. Hautefuille, A. Perrey. Compt. Rend. 106, 1800 (1888).
- [4] H.E. Espig, Z. Krist. 92, 387 (1935).
- [5] R.C. Linares, A.A. Ballman, L.G. Van Uitert. J. Appl. Phys. 33 (11) 3209 (1962).
- [6] E.M. Flanigen, A.M. Taylor. U.S. Patent 3341302 (1967).

Original recibido: Enero 1997.  
Original aceptado: Abril 1997.

# INFORMACION

## INGENIEROS DE MINAS ARQUEOLOGOS EN EL SIGLO XIX. LA HUELLA DE PRADO.

HOMENAJE A CASIANO DE PRADO (1797-1866) EN EL BICENTENARIO DE SU NACIMIENTO.

Por O. PUCHE (\*) Y M. AYARZAGÜENA (\*\*)

### INTRODUCCION

Con motivo del bicentenario del nacimiento de Casiano de Prado, los autores del trabajo hemos querido rendirle un homenaje con esta tabla cronológica, donde se observa la importancia que tuvieron los ingenieros de minas en la arqueología española, especialmente la prehistórica, durante el siglo XIX. En su tiempo, Prado fue el inductor y el más importante activista en pro de la Ciencia prehistórica, no sólo entre los ingenieros de minas, sino también en buena parte de la comunidad científica. Casiano de Prado, que estaba al tanto de las investigaciones que a este respecto se estaban realizando en Francia desde los años 50, especialmente las de Boucher de Perthes, marca los inicios de los estudios prehistóricos en España. Al principio, hace estas investigaciones de forma privada, y las divulga a partir de 1862 cuando descubre, conjuntamente con Luis Lartet y con Verneuil, un bifaz paleolítico en San Isidro. Con este hallazgo será España el tercer país en el mundo, tras Francia e Inglaterra, donde se reconozca la existencia del ser humano durante la prehistoria.

Pero el mérito de Prado no consiste sólo en los descubrimientos que hizo, sino

que, como Jefe de la Comisión Permanente de Geología Industrial, remitió a los Ingenieros Jefes de los Distritos Mineros una circular en la que los animaba a la búsqueda de útiles prehistóricos en diversos tipos de yacimientos, especialmente en cuevas, que tuvo amplio eco entre muchos ingenieros de minas. Esta corriente favorable a los estudios prehistóricos convergió con aquella otra resultante del estudio de aquellos objetos que aparecían en las labores de minas antiguas. Otras de sus aportaciones fueron de carácter más epistemológico y metodológico, como son el establecimiento de una Edad del Cobre previa a la de el Bronce, cuando todavía no se admitía así en Europa, y la utilización sistemática de la estratigrafía en las prospecciones arqueológicas que llevaba a cabo en cuevas. Además, su influencia se notó en el campo institucional: la Escuela de Minas de Madrid tuvo la primera exposición permanente en España de objetos prehistóricos, la Revista Minera resultó un portavoz puntual de los progresos que se realizaban en Arqueología y la Comisión para la formación del Mapa Geológico siempre hizo un hueco importante a la Arqueología.

Por otra parte, en España tuvimos la for-

tuna de que a la muerte de Prado, un joven geólogo, Juan Vilanova y Piera, tomara el testigo de este tipo de estudios. Juan Vilanova, hermano del ingeniero de minas José Vilanova, aunque naturalista, tenía también formación en minas por los estudios que realizó en la Escuela de Minas de París, donde recibió clase de Geología (Elie de Beaumont), Paleontología (Bayle) y Mineralogía (Senarmont), y ello resultó determinante en su inclinación hacia los estudios prehistóricos. Juan Vilanova mantuvo fluidas relaciones con ingenieros de minas e, incluso, con algunos de ellos realizó prospecciones conjuntas.

Un tercer momento en los estudios prehistóricos españoles del siglo XIX fue el que marcó el ingeniero de minas belga Luis Siret. Cuando ya Juan Vilanova se encontraba en los últimos años de su vida, Luis Siret toma el liderazgo de estos estudios en nuestro país, ante la riqueza arqueológica que se le ofrece allá por donde excava. De mayor aceptación en el extranjero que Vilanova, enlaza ya con los grandes prehistoriadores españoles que surgirán en la segunda década del presente siglo, como Pere Bosch Gimpera, Juan Cabré, José Miguel de Barandiarán, y un largo etc.

(\*) E.T.S.I. de Minas de Madrid e I.N.H.I.G.E.O.

(\*\*) Historiador de la Arqueología. I. B. Juan Carlos I (Ciempozuelos).

AÑO	MINERIA Y ARQUEOLOGIA ESPAÑOLAS	HISTORIA DE LA ARQUEOLOGIA EN ESPAÑA Y EN EL MUNDO
1776		Johan Friedrich Blumenbach (1752-1840) es nombrado conservador de la colección de Historia Natural de la Universidad de Gotinga.
1777	Por R.O. de Carlos III se crea la Academia de Minas de Almadén.	
1778		Juan Federico Blumenbach es nombrado profesor ordinario de la Facultad de Medicina de la Universidad de Gotinga donde se encarga de formar las colecciones antropológicas y etnográficas. Es considerado el fundador de la Antropología científica.
1797		Hallazgo de bifaces en Hoxne (Suffolk, Gran Bretaña) realizado por John Frere (1740-1807).
1804		Fundación de la Academia céltica francesa, centro de reunión de los celtómanos.
1807		Fundación del Museo de Antigüedades Nacionales de Copenhague.
1809		Jean Baptiste Monet, Caballero de Lamarck (1744-1829), publica <i>Philosophie zoologique</i> , donde el autor expone sus teorías transformistas.
1814		Primeras observaciones estratigráficas realizadas por Traullé en el valle del Somme.
1818		Juan Ramis (1746-1819) escribe una obra titulada <i>Antigüedades célticas de la Isla de Menorca</i> que, con profundo carácter ilustrado, rompe en muchos casos con teorías fabulosas acerca de las construcciones megalíticas y resulta de obligada referencia para conocer el estado de los conocimientos y nuevas tendencias acerca de este tema en la primera mitad del siglo XIX.
1819		Se inaugura el Museo Nacional de Dinamarca, donde Cristian Jurgensen Thomsen (1788-1856) establece la clasificación de las Tres Edades (de la Piedra, del Bronce y del Hierro).
1822		William Buckland (1784-1856) publica <i>Reliquae Diluvianae</i> , donde asimila los aluviones recientes con los vestigios del Diluvio bíblico, designándolos con el término diluvium.
1823		Ami Boué (1794-1881), fundador de la Sociedad Geológica de Francia, realiza en el loess del valle del Rhin el primer descubrimiento de un esqueleto humano asociado a huesos fósiles de especies desaparecidas.

1825		Investigaciones de MacEnery (1796-1841) en la Cueva de Kent (Devonshire, Gran Bretaña), excavaciones que prosiguió hasta su muerte. Plainville utiliza por primera vez el término Paleontología. Georges Cuvier (1769-1832) publica <i>Discours sur les révolutions de la surface du globe</i> , donde para algunos autores niega la existencia del hombre fósil, aunque no lo hace de forma explícita.
1826		Excavaciones de Paul Tournal (1805-1872) en cuevas de Bise (Aude) y de Boucher de Perthes (1788-1868) en Abbeville. Las excavaciones de Tournal dan como fruto el primer descubrimiento de hombre fósil en las cavernas francesas.
1828	Casiano de Prado (1797-1866) inicia sus estudios en la Academia de Almadén.	Amédée Thierry (1797-1873) expone en la <i>Histoire des Gaulois</i> el punto de vista de los celtómanos.
1829		Jules de Christol (1802-1861) da a conocer sus investigaciones prehistóricas en el Dpto. de Gard, confirmando los descubrimientos de Tournal.
1830	El Director del Cuerpo de Minas, Fausto de Elhúyar (1757-1833) remite, con destino a la Escuela de Minas de Freiberg, a los mejores alumnos de Almadén para que completen su formación.	Charles Lyell, fundador del uniformismo, publica los <i>Principles of Geology</i> . Schmmerling (1791-1836) busca y descubre restos humanos conjuntamente con otros de <i>Rhinoceros</i> , hiena de las cavernas y oso de las cavernas en sus prospecciones en la cueva de Engis (próx. a Lieja), lo que demostraba la coexistencia del ser humano con esos animales extinguidos confirmando así las investigaciones de Tournal.
1831	La Dirección General de Minas ordena comprar diversas colecciones mineralógicas para mejorar la calidad de la enseñanza de los ingenieros. Las primeras muestras arqueológicas que llegan a la Escuela de Minas proceden de una de estas colecciones, adquirida en Freiberg, concretamente la del Dr. Rohatzsch.	Se encuentra el dolmen de Eguilaz, primero de los descubiertos en el País Vasco, al hacer la carretera entre Vitoria y Pamplona.
1833		Tournal utiliza el término "préhistoire" por primera vez.
1834	La Dirección General de Minas compra la colección mineralógica de Ciriaco de Carbajal, Oidor de la Audiencia de México. En ella aparecen varios útiles de importancia arqueológica en obsidiana, de gran interés, (Fig. 1) y otras piezas procedentes de "huacas" (enterramientos).	Descubrimiento de una plaqueta grabada magdaleniense en Chaffaud, que es catalogada como céltica.

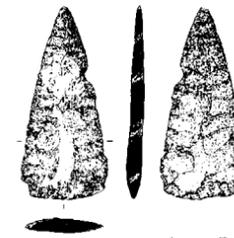
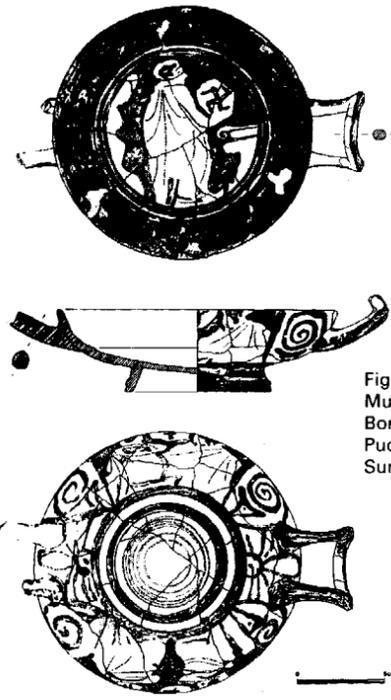


Fig. 1 - Alabarda de obsidiana procedente de una huaca, Oaxaca, México, comprada por la Dirección General de Minas (1834) a la viuda del Oidor de la Audiencia de México D. Federico de Carvajal

1835	La Academia de Almadén traslada la docencia a Madrid, quedando como centro de prácticas.	Casimir Picard (1806-1841) publica la "Notice sur les instruments celtiques ..." que es el primer estudio tipológico de útiles prehistóricos.
1837		Edouard Lartet (1801-1871) descubre un antropoide fósil (pliopiteco) en los terrenos terciarios de Sansan (Francia). Boucher de Perthes empieza a recoger útiles líticos en el valle del Somme.
1839	En la Escuela de Minas, Rafael Amar de la Torre (1802-1874) empieza a impartir la asignatura de Paleontología por primera vez en España. De esta disciplina la Prehistoria tomó buena parte de su método científico.	
1840	<p>Aparecen restos romanos en la mina San Cristóbal de Mazarrón (Murcia), entre ellos un Hércules Farnesio del que en 1868 Federico de Botella (1822-1899) publica un grabado, y es elogiado por Emilio Hübner en su obra <i>La Arqueología de España</i> (1888:266-267). (Fig. 2). Vicente Moreno y Berardo describe las antiguas minas de Sierra Almagrera en el periódico <i>La Alhambra</i>.</p>  <p>Fig.2 - Hércules Farnesio, reproducido por D. Federico de Botella, en la "Descripción Geológico-Minera de las provincias de Murcia y Albacete"</p>	José M <sup>a</sup> Bover de Roselló (1810-1865) publica en <i>Semanario Pintoresco Español</i> un artículo sobre los monumentos megalíticos de Mallorca.
1841	<p>A partir de esta fecha empieza a aparecer abundante bibliografía sobre la minería antigua de la Península, con diversos datos de Arqueología Minera. Destacamos los nombres de los ingenieros de minas: Guillermo Schulz (1800-1877), Antonio Adriano Paillette (1809-1858), Joaquín Ezquerro del Bayo (1793-1859), Ramón Rúa de Figueroa (1820-1874) y Ernest Deligny, entre otros. El primero de ellos, Guillermo Schulz, publica ese mismo año en los <i>Anales de Minas</i> un artículo sobre "Algunos datos para la historia de la minería de Asturias y Galicia" donde hace especial hincapié en la correspondiente a los minerales nobles. Lorenzo Gómez Pardo (1801-1847), reformador y a su vez miembro de la Dirección General de Minas, ingresa en la Sociedad Numismática Matritense, precedente directo de la Real Academia de Arqueología del Príncipe Alfonso.</p>	

1842		El arquitecto malacitano Rafael Mitjana descubre Cueva de Menga (Antequera), que tomó como templo druidico celta, publicando sus conclusiones en 1847.
1843		Jens Jacob Worsae (1821-1885) publica <i>The Primeval Antiquities of Denmark</i> donde expone el sistema de las tres edades.
1844	En el primer tomo del <i>Boletín Oficial de Minas</i> se da cuenta del descubrimiento de un trozo de barreno romano en Almadén, que se remitió con destino al Gabinete de Máquinas. Igualmente se informa de hallazgos relacionados con trabajos antiguos realizados en las minas de Guadalcanal.	Auguste Aymard (1808-1889) anuncia el descubrimiento de restos humanos en los depósitos volcánicos de Denise (Alto Garona).
1845	<p>Aparece en el <i>Boletín Oficial de Minas</i> noticia acerca de huesos humanos descubiertos por el Dr. Lund en las cavernas del Brasil; un informe de Ramón Pellico sobre la "Mina antigua de la Sima", donde encontró restos de época romana; un comentario de Guillermo Schulz acerca de sus prospecciones arqueológicas en las minas antiguas de Fornaza, Bodeguillas y Gralleiras, si bien él explica que de sus descubrimientos no se puede deducir que se pudiera adelantar la aparición del ser humano en la Península Ibérica; y Joaquín Ezquerro del Bayo plantea la necesaria protección de los hornos antiguos que se habían descubierto en escombros del Campo de Cartagena, zona donde estaba apareciendo mucho material antiguo (Fig.-3). El francés Antonio Adriano Paillette (1809-1858) publica unos <i>Apuntes históricos sobre la minería antigua del Principado de Asturias</i>.</p>  <p>Fig.3 - Kylix griega (siglo IV a.C.). Museo Histórico Minero D. Felipe de Borbón, Escuela de Minas de Madrid. Pudiera proceder del Levante o del Sur de España.</p>	El propietario José Pla (Ollería, Valencia) descubre los yacimientos valencianos de Castellet del Porquet y la Cueva de San Nicolás, los cuales excava buscando tesoros.
1846	Se descubre el Jaroso (Almería) que se pensaba era más rico que el Potosí. Al estar ubicado en una zona de ricos yacimientos arqueológicos donde existían labores antiguas, en el futuro se harían importantes descubrimientos en la zona.	Se constituye el Comité de la Sociedad Tourquay de Historia Natural para explorar la Cueva de Kent.

1848		El teniente inglés Flint descubre en la cueva gibraltareña de Forbes' Quarry el famoso cráneo de un neandertaloide, si bien el hallazgo pasa desapercibido.
1849	Se crea la Comisión para formar la Carta Geológica de Madrid y General del Reino. Francisco de Luxán (1797-1867) se hace cargo de la misma mostrando interés por la minería de época romana. Casiano de Prado es nombrado vocal de la misma, con responsabilidad en la Sección de Geología.	Boucher de Perthes publica el primer tomo de <i>Antigüedades célticas y antediluvianas</i> (en el libro la fecha que aparece es de 1847).
1850	Casiano de Prado inicia el estudio geológico de Madrid. Inspecciona los Altos de San Isidro recogiendo útiles paleolíticos de sílex (uno de ellos se encuentra depositado todavía en la Escuela de Minas, según ha descubierto Octavio Puche).	Se descubre el Dolmen de Dílar (Dílar, Málaga).
1851	Nombramiento de Juan Vilanova como catedrático de Geología y Paleontología de la Universidad Central. Casiano de Prado visita París y Londres este año y al siguiente. En la capital francesa entra en contacto con Pruner Bey (1808-1882), quien le anima a que realice estudios arqueológicos.	
1852	Felipe Naranjo (1824-1877) publica en Revista Minera (pp. 722-726) unos "Estudios históricos sobre Paleontología", convirtiéndose así en uno de los introductores de esta disciplina en nuestro país.	
1853	Casiano de Prado se inicia en el estudio de las cavernas durante los trabajos para la "Descripción de la provincia de Segovia", encontrando en la Cueva de Riaza restos de fauna mezclados con huesos humanos y cerámica. Anima a geólogos, naturalistas y anticuarios a que prospecten las cuevas.	Eduardo Saavedra (1829-1912) localiza Numancia al realizar excavaciones en el cerro de Garray cuando estaba haciendo el estudio sobre la vía romana que se sabía existía entre Uxama y Augustóbriga.
1854	De forma anónima, Guillermo Schulz, da la primera noticia de restos arqueológicos de la Mina del Milagro (Onís, Murcia) en <i>Revista Minera</i> , donde comenta la utilización de martillos elaborados en asta de ciervo en vez de en hierro. En la misma revista Casiano de Prado informa que en cuevas de Riaza ha encontrado unos "huesos humanos y fragmentos de alfarería", algunos de los restos de gran antigüedad, pues se hallan situados debajo de la capa estalagmítica y de los que no encuentra explicación a su ubicación.	Rigollot (1786-1854) publica <i>Mémoires sur les instruments en silex trouvés à Saint Acheul</i> (Amiens, Francia), donde reconoce la validez de los estudios de Boucher de Perthes. Tras una gran sequía, Ferdinand Keller constata en Meilen (junto al lago de Zürich) la existencia de la primera estación lacustre conocida.
1855	Casiano de Prado vuelve a París, ampliando sus relaciones con los principales geólogos franceses. En la <i>Memoria que comprende el resumen de los trabajos verificados en 1853 por las diferentes secciones encargadas de formar el mapa geológico de la Provincia de Madrid y el general del Reino</i> informa de la multitud de hallazgos que había hecho en cuevas de Pedraza, entre los que cabe destacar huesos humanos mezclados con otros de hiena. Anima a la exploración de las cuevas con el fin de realizar hallazgos del tipo que Lund había verificado en Brasil.	
1856		Descubrimiento del cráneo de Neandertal.
1857		Segundo volumen de las <i>Antigüedades célticas y antediluvianas</i> donde el padre Boucher de Perthes abandona sus ideas catastrofistas en beneficio de las uniformistas. Formación del Museo Nacional de Antigüedades francés.

1858	Casiano de Prado remite a Eduardo Lartet un fragmento de molar de <i>Elephas</i> y el dibujo de otro molar completo procedentes del diluvium de Madrid, quien para esas fechas ya había concentrado su atención en el hombre fósil. Se presenta un informe de este descubrimiento en <i>Revista Minera</i> (p. 749), así como se da noticia del descubrimiento de un antiguo horno de fundición en la provincia de Huelva, el cual pensaba ser conservado como monumento histórico por el Director de Minas de Tharsis. Ezquerria del Bayo, en el <i>Boletín Oficial del Ministerio de Comercio, Instrucción y Obras Públicas</i> , realiza un estudio de los escoriales en la Antigüedad, haciendo especial referencia a los de Río Tinto y los del término de Cartagena. Resulta de gran interés la reproducción que hace de hornos antiguos descubiertos en dicha zona. Guillermo Schulz, en la <i>Descripción geológica de la Provincia de Oviedo</i> insiste en la antigüedad e importancia de la Mina del Milagro.	William Pengelly (1812-1894) comienza a excavar en la Cueva de Brixham (Tourquay, Devonshire, Gran Bretaña). Excavaciones en La Tène por Schwab. Falconer (1808-1865) visita a Boucher de Perthes en relación con los yacimientos del Somme. Descubrimiento del yacimiento lacustre de Robenhausen.
1859	El profesor de la Escuela de Minas y miembro de la Sociedad Arqueológica Tarraconense, Amalio Maestre (1812-1872) dona al Museo de la Escuela de Minas varios objetos arqueológicos. Ramón Rúa de Figueroa escribe un <i>Ensayo sobre las historia de las Minas de Río Tinto</i> que tendrá amplia repercusión, tanto nacional como internacional.	Aparece <i>Origin of Species</i> de Darwin (1809-1882). Joseph Prestwich (1812-1896) da a conocer en la Royal Society <i>On the Occurrence of Flint Implements associated with the Remains of Animals of Extinct Species</i> . A raíz de este informe admite oficialmente la existencia del hombre anterior a los últimos cataclismos. Paul Broca (1824-1880) funda la Sociedad Antropológica de París. Hallazgo de la calota craneana de Neanderthal, que en un primer momento se toma por moderna.
1860	Casiano de Prado recibe un hacha de sílex del diluvium inferior del Somme, en Amiens, que se deposita en el Museo de la Escuela de Minas, según se menciona en <i>Revista Minera</i> (p. 716). En la misma revista (pp. 55-62) José de Monasterio publica un artículo en el que divulga por primera vez en España los avances y reconocimiento que la Ciencia prehistórica estaba alcanzando en Europa especialmente las teorías de Boucher de Perthes. Hace especial referencia al artículo que el sacerdote francés Francisco Moigno (1804-1884) publica en <i>El Cosmos</i> a raíz de una carta de Worsae (1821-1885) al Atheneum de Londres. De esta forma Monasterio se anticipa por muy poco a lo dicho por Juan Vilanova (1821-1893) en el segundo tomo de su <i>Manual de Geología</i> (1860-1).	Hallazgos de Eduardo Lartet en Aurignac.
1861	Aparece en <i>Revista Minera</i> (pp. 193-199), traducida al castellano, la reproducción de una nota de Eduardo Lartet titulada "Sobre la antigüedad de la especie humana en la Europa Occidental", que había sido presentada a la Academia de Ciencias francesa el 19 de marzo de 1860. En la misma revista (pp. 250-254) aparece otra nota, intitulada "Sobre los fósiles encontrados en el diluvium del departamento del Somme: Observaciones de M. Boucher de Perthes con motivo de una reciente comunicación sobre las piedras trabajadas por los primitivos habitantes de las Galias" donde el autor defiende los estudios prehistóricos.	Primer proyecto de clasificación de las épocas prehistóricas con la ayuda de la Paleontología realizado por E. Lartet y publicado en los <i>Annales des Sciences Naturelles</i> .
1862	Luis Lartet (1840-1899), hijo de Eduardo Lartet, en compañía de Eduardo Verneuil (1805-1873) y Casiano de Prado encuentran en los Altos de San Isidro un hacha paleolítica de sílex. Este descubrimiento se considera el inicio de los estudios prehistóricos en España, sin embargo, Prado ya había realizado estudios previos, aunque no se había atrevido a divulgarlos, y luego a reconocerlos, por el ambiente social adverso hacia el cambio de cosmovisión que había en aquellos momentos. El ingeniero Federico de Botella inicia la formación de un museo arqueológico en la comarca de Cartagena (véase <i>Revista Minera</i> XIII, p. 286). En la misma revista (pp. 216-217) se publica la conclusión de una carta	

	<p>enviada por el geólogo francés Delanöue a la revista, la cual es copia de la enviada por el autor al Ministro de Instrucción francés, a favor de la coexistencia del ser humano con especies fósiles desaparecidas. El mismo tema vuelve a aparecer en la misma revista (p. 349).</p>	
1863	<p>En el <i>Bull. de la Soc. Géol. de France</i> (pp. 698-702) Eduardo Verneuil y Luis Lartet presentan una nota donde informan del hallazgo prehistórico de San Isidro, realizado conjuntamente con Casiano de Prado el año anterior. Hacen notar que después de Francia e Inglaterra éste es el tercer país donde se constata la existencia de sílex tallados en terrenos cuaternarios.</p> <p>Se da cuenta en <i>Revista Minera</i> (pp. 504-507) del hallazgo de Moulin Quignon de ese mismo año.</p> <p>Ernesto Deligny escribe <i>unos Apuntes históricos sobre las Minas Cobrizas de la Sierra de Tharsis</i> en los que da importantes noticias de carácter arqueológico-minero. Inicia los apuntes en la época fenicio-cartaginesa y los continúa con la época romana, dando amplias referencias a la obra de Rúa de Figueroa.</p> <p>Se crea la Real Academia de Arqueología y Geografía del Príncipe Alfonso en cuya composición intervienen varios ingenieros de minas, entre ellos Ramón Rúa de Figueroa.</p>	<p>Descubrimiento de la mandíbula de Moulin-Quignon. A pesar de ser una falsificación, posibilitó que los miembros de la Academia de Ciencias francesa aprobaran los estudios prehistóricos por mayoría.</p> <p>Charles Lyell (1797-1875) publica <i>La Antigüedad del hombre probada por la Geología</i> que es la primera obra de carácter general que trata sobre la alta antigüedad del ser humano.</p> <p>El Director de Trabajos Geológicos de Portugal, Carlos Ribeiro (1813-1882) realiza las primeras prospecciones del yacimiento de Cabeço d'Arruda en Muge.</p>
1864	<p>Falconer y Busk visitan los objetos de valor prehistórico que se encontraban en la Escuela de Minas de Madrid, destacando el interés de la colección.</p> <p>Casiano de Prado publica la <i>Descripción física y geológica de la Provincia de Madrid</i>. En este libro se considera al ser humano como un mamífero más dentro del capítulo de la Paleontología, si bien se destaca la supremacía que ejerce sobre los demás seres. Demuestra que se encuentra informado puntualmente de todo lo que sobre prehistoria se publica en revistas especializadas europeas, y señala la existencia de industrias líticas en Madrid y la ubicación de estos útiles por debajo de las capas del Elephas, con lo que se refuerzan sus argumentos sobre la antigüedad del ser humano. Resalta la necesidad de explorar las cavernas por capas o niveles, para así poder clasificar los restos hallados en función de su antigüedad y la necesidad de crear un museo especial al que él donaría los objetos que había recolectado. Destaca en la obra que el cobre debió utilizarse antes que el bronce, lo que le coloca como predecesor de Vilanova en este aspecto, y como adelantado en casi medio siglo a la postura generalizada del resto de prehistoriadores europeos, indicando que no conoce a nadie antes que él que hubiese tomado esta postura.</p> <p>Termina la obra con una noticia sobre las cavernas y minas primordiales de España, donde habla incluso del famoso cráneo de Gibraltar del que tenía noticias gracias a Falconer y Busk y un estudio de los restos de la mina del Milagro de Onís (Fig. 4), especialmente de los humanos, comentando que a uno de ellos Busk lo había clasificado como de raza vasca. ¿Estamos ante los prolegómenos de la formulación de las teorías nacional-racial vascas?</p>	<p>El sacerdote José de Llano descubre en Alcalá de Chivert una necrópolis funeraria formada por 19 urnas.</p> <p>Tercero y último volumen de las <i>Antigüedades célticas y antediluvianas</i> de Boucher de Perthes.</p> <p>Primer trabajo sobre el arte mobiliario paleolítico por parte de Lartet y de Christy.</p> <p>Gabriel de Mortillet (1821-1898) crea la revista <i>Matériaux pour l'histoire positive et philosophique de l'homme</i>, primera revista dedicada específicamente a la prehistoria.</p>

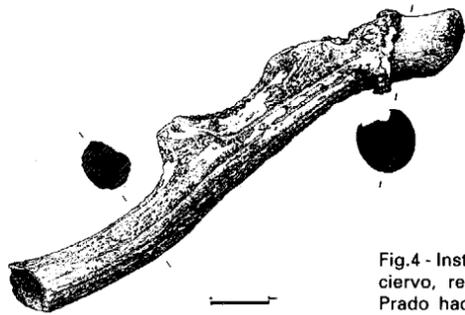


Fig.4 - Instrumento minero de asta de ciervo, recibido por D. Casiano de Prado hacia 1864, procedente de la mina de El Milagro, Onís, Asturias

	<p>Ese mismo año, el ingeniero de minas Ramón Rúa Figueroa, miembro de la Academia de Arqueología y Geología del Príncipe Alfonso, indica que es sensible que en nuestra Escuela de Minas no se haya instalado todavía un museo arqueológico minero.</p> <p>Eduardo Lartet remite a la Escuela de Minas, a través de Casiano de Prado, piezas prehistóricas de su excavación, con Henry Christy (1810-1865), en Les Eyzes (Perigord, Francia). (Fig. 5).</p>	
		<p>Fig.5 - Cuchillo de sílex de Perigord. Probablemente formara parte de la donación remitida a D. Casiano de Prado por D. Edouard Lartet desde Les Eyzes</p>
	<p>En <i>Revista Minera</i> (pp. 45-49) Rúa de Figueroa escribe un artículo sobre los ungüentarios de Río Tinto. Además, se da cuenta (pp. 153-154) del hallazgo en una cueva de Bruniquel (Francia) de arte mobiliario; del hallazgo del primer útil prehistórico en los alrededores de París (p. 394); del posible descubrimiento de Troya (p. 475); de las discusiones internacionales sobre la autenticidad del cráneo de Moulin-Quignon (pp. 473-475), de la incesante actividad en Arqueología prehistórica existente en Francia (pp. 638-639); de un informe presentado a la Academia de Ciencias de París por Milne Edwards y Eduardo Lartet sobre "El hombre antediluviano" y su contemporaneidad con animales prehistóricos (pp. 638-639); y un informe presentado por Armand de Quatrefages (1810-1892) en nombre de F. Garigon y M. Filhol bajo el título "Contemporaneidad del hombre y de Ursus spelaeus establecida por el estudio de los huesos hendidos de las cavernas" (pp. 317-322).</p>	
1865	<p>El ministro Alcalá Galiano reorganiza la Comisión del Mapa Geológico. Entre los objetivos que se asignan a dicho organismo se encuentra el estudio y catalogación de los objetos pertenecientes a épocas antiguas que se encuentren en las excavaciones de las minas, cavernas y otros trabajos subterráneos.</p> <p>Casiano de Prado, como Jefe de la Comisión Permanente de Geología Industrial, remite a los Ingenieros Jefes de los Distritos Mineros una circular para que se busquen y estudien todos los elementos posibles relacionados con la Prehistoria. Llama la atención lo puesto al día que se encontraba Prado en materia prehistórica, pues comenta la existencia de una segunda Edad de Piedra para referirse al Neolítico, período que ese mismo año había sido descrito por John Lubbock (1834-1913) por primera vez.</p> <p>En <i>Revista Minera</i> (p. 178) se informa que el alemán Klemm, tras observar algunas de las piezas líticas de la mina del Milagro, constató haber visto otras similares en minas antiguas de Cerro Muriano, en Córdoba. Asimismo, se da cuenta de la creación de la Sociedad Antropológica Española (pp. 360-364) a iniciativa del doctor Pedro González de Velasco (1815-1882), en la que parece que participan varios ingenieros de minas; y Felipe Naranjo informa (pp. 384-410) de la existencia de un museo en la mina de San Juan Bautista, de la Sociedad El Fraile, creado ese mismo año.</p>	<p>John Lubbock (1834-1913) publica <i>Prehistoric Times</i>, donde se divide la Edad de Piedra en Paleolítico y Neolítico.</p> <p>Ildefonso Zubía y Luis Lartet descubren varias cuevas con yacimiento prehistórico en la Sierra de Cebollera (actual comunidad de La Rioja), especialmente Cueva Lóbraga, donde el último aplica la clasificación paleontológica de su padre Eduardo. Un cráneo encontrado en dicha cueva fue estudiado al año siguiente por Pruner Bey y presentado a la Sociedad Antropológica de París.</p> <p>Pereira da Costa (1809-1889), director de la Comisión Geológica de Portugal, escribe una obra titulada <i>Noticia sobre os esqueletos humanos descubiertos no Cabeço da Arruda</i>. Entendemos que la influencia ejercida por Prado en Ribeiro y Pereira da Costa es manifiesta.</p>

1866	<p>Muere Casiano de Prado (de su muerte se hace eco <i>Revista Minera</i> en pp. 417-419, 449-453 y 486-490) tras visitar Cerro Muriano y recolectar varias piezas arqueológicas, hoy extraviadas. En esos momentos estaba organizando para la Exposición Internacional de París la parte de Minería remitida por España, para lo que había solicitado a los ingenieros de minas de provincias objetos arqueológicos. Estas piezas fueron presentadas por Amalio Maestre. Luis Lartet presentó en la misma Exposición objetos recogidos en Cueva Lóbrega y Peña de la Miel.</p> <p>La Escuela de Minas adquiere a la familia Prado su colección paleontológica, sin que hayamos podido verificar que englobase piezas arqueológicas.</p>	<p>Primer congreso internacional de Antropología y Arqueología prehistóricas celebrado en Neuchatel.</p> <p>Durante el verano, Juan Vilanova prospecta, con su discípulo Eduardo Boscá (1843-1928), diversas cuevas valencianas, entre ellas Parpalló y Cova Negra, y a finales de año Juan Vilanova y Piera empieza a impartir Prehistoria en su cátedra del Ateneo, cursos que dará durante más de quince años.</p> <p>Ribeiro da a conocer los yacimientos prehistóricos por él descubiertos en el valle del Tajo.</p> <p>El alemán Jagor encuentra un yacimiento en la Cueva de Balzola (Dima, Vizcaya), que sería estudiada por el ingeniero de minas Gálvez Cañero a principios del siglo XX.</p>
1867	<p>Se crea el Museo Arqueológico Nacional, en el que el ingeniero de minas Antonio Poupart (†1874) colaboraría en la organización de la sección de Prehistoria, dirigida por Manuel de Assas. Según M<sup>a</sup> Victoria Goberna (1985) y otros autores, la Escuela de Minas remitió al Museo Arqueológico Nacional diversos objetos prehistóricos para su formación, dato que estamos tratando de contrastar.</p> <p>Se celebra la Exposición Internacional de París a la que acude Amalio Maestre, en sustitución del recientemente fallecido Casiano de Prado, presentando, junto a las colecciones mineralógicas, otras prehistóricas. Parte de los objetos los había encontrado el propio Maestre, que junto con Felipe Martín Donayre (1825-1890) había explorado algunas cuevas, siguiendo las indicaciones de Prado, en cavernas de Aragón. La colección que se formó fue a parar a la Escuela de Minas de Madrid, siendo ésta una de las primeras exposiciones permanentes de material prehistórico existentes en España (según señala Manuel de Assas (1813-1880)). Aprovechando dicha exposición tiene lugar el II Congreso Internacional de Antropología y Arqueología Prehistóricas, al que asiste el inspector general del cuerpo de ingenieros de minas Ramón Pellico y Molinillo, y debemos pensar que, aunque no aparezca en la relación oficial, también asistió Amalio Maestre. Figuraban, además como participantes, y presentaron comunicación, Juan Vilanova y Antonio Machado (1815-1896). El ingeniero de minas José Vilanova, junto con su hermano Juan, Tubino (1834-1888), Roca y Maraver exploran con fines arqueológicos los alrededores de Cabra y Sevilla (en estas dos últimas localidades acompañados del naturalista Antonio Machado y de Alava, rector de la Universidad de Sevilla). Otra visita de interés fue la realizada a San Isidro durante la primavera por parte de Juan Vilanova, Verneuil y Favre (1815-1890) donde establecieron una relación entre la estratigrafía de este yacimiento y la de Abbeville.</p> <p>Simonin, en su obra <i>La vie souterraine</i>, reproduce un martillo de piedra de las minas antiguas de Cerro Muriano, Córdoba, así como dedica una especial importancia a la mina del Milagro, que toma por la más antigua del mundo y clasifica como de los inicios de la Edad del Bronce y analiza los martillos de piedra y los cinceles en asta de ciervo.</p> <p>José Amador de los Ríos (1818-1878), con motivo de la presentación de un "cuchillo de pedernal" descubierto por el ingeniero de minas José Martínez Villa en las minas de Hornachuelos, elabora una memoria para la Real Academia de la Historia, que es publicada en la <i>Revista de Bellas Artes e Histórico-Arqueológica</i>.</p>	<p>En otoño aparece por primera vez la palabra "prehistoria" en castellano. El término sale de la pluma de Francisco M<sup>a</sup> Tubino en su periódico <i>La Andalucía</i>.</p> <p>Inauguración del Museo de Antigüedades Nacionales francés en Saint-Germain.</p> <p>El abate Bourgeois (1819-1878) descubre pretendidos útiles de sílex en los terrenos terciarios de Saint-Prest y de Thenay, los cuales presenta en la Exposición de París. Se inicia así el debate sobre la existencia del hombre terciario.</p> <p>José Letamendi (1828-1897) imparte en el Ateneo Catalán la conferencia <i>Discurso sobre la Naturaleza y Origen del Hombre</i>, donde se dan a conocer en España por primera vez de una forma institucional las teorías darwinistas.</p> <p>Como hiciera el año anterior, Juan Vilanova prospecta durante el verano las cuevas valencianas de Cova Negra y Parpalló. Inicia excavaciones en las de Tabernes, San Nicolás (Ollería), Avellanera (Catadáu) y Maravillas (Gandía).</p> <p>Manuel de Góngora (1822-1884) visita la caverna de los Murciélagos (Albuñol).</p> <p>La Prehistoria es admitida en la Real Academia de la Historia. Poco después será denostada por problemas ideológicos, pasando esta disciplina en la Academia una travesía del desierto hasta 1886.</p> <p>Luis Maraver y Alfaro, inspector de antigüedades y conservador del Museo Arqueológico de Córdoba realiza una prospección en el yacimiento de Almedinilla donde encuentra gran número de objetos ibéricos, entre ellos unas falcatas, que no sabe clasificar adecuadamente ante el desconocimiento que existía sobre esa cultura.</p>
1868	<p>Se da a conocer en <i>Revista Minera</i> la cueva de Atapuerca (p. 555) y el hallazgo de un gran mamífero fósil (pp. 183-185) en los alrededores de Madrid.</p> <p>El ingeniero de minas José Vilanova dona al Museo Arqueológico</p>	<p>Francisco M<sup>a</sup> Tubino compila en un pequeño libro, <i>Estudios Prehistóricos</i>, toda una colección de conferencias y pequeños artículos que él había escrito poco antes y se encon-</p>

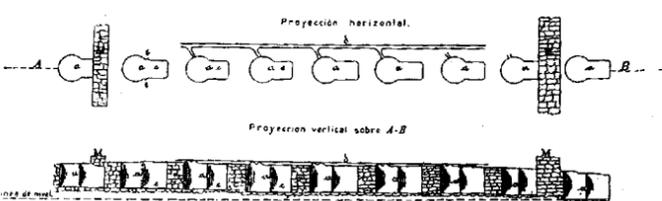
	<p>Nacional un busto de piedra, al parecer de época romana, encontrado en Cerro Muriano, y una vasija de cobre, de la misma época, hallada en el fondo de una mina de Ayamonte. El busto fué también destacado por Hübner en <i>La Arqueología de España</i> (1888, p. 227).</p> <p>Federico Botella publica la <i>Descripción geológica-minera de las provincias de Murcia y Albacete</i>, distrito del que era ingeniero jefe. En ella demuestra su interés por la Arqueología, del cual ya había dejado constancia por su deseo manifestado de crear un museo arqueológico. Con una gran riqueza en ilustraciones muestra un magnífico "Hércules Farnesio" hoy en paradero desconocido, aunque según Eulogio Saavedra (1829-1896), en su obra póstuma <i>Mastia y Tarteso</i> (1929), en la última década del siglo XIX se encontraba dicha escultura depositada en la Escuela Central de Minas.</p>	<p>traban dispersos en revistas y periódicos.</p> <p>Manuel de Góngora publica el libro <i>Antigüedades Prehistóricas en Andalucía</i>, magnífica obra que aún hoy llama la atención por su presentación, contenido y método.</p> <p>En el mes de abril, Juan Vilanova, Delanoüe, Machado y Tubino realizan una visita a Cerro Muriano, que resultó fructífera y motivó una Memoria que fue publicada en la <i>Gaceta de Madrid</i> de 20 de julio.</p> <p>Descubrimiento de restos humanos en Cro-Magnon que permitieron determinar la sucesión en Europa de dos tipos humanos diferentes: de Neanderthal y de Cro-Magnon.</p> <p>III Congreso Internacional de Antropología y Arqueología Prehistóricas celebrado en Norwich. No asiste ningún español, pero Juan Vilanova y Antonio Machado envían su comunicación por carta. Por otra parte George Busk expuso un detallado informe sobre las excavaciones que se venían haciendo en Gibraltar.</p>
1869	<p>Se divulgan en <i>Revista Minera</i> estudios sobre el darwinismo, manteniendo la línea editorial una postura contraria a los mismos. Igualmente informa de hallazgos prehistóricos realizados en Francia y el descubrimiento de una cueva en Rivadesella.</p> <p>IV Congreso Internacional de Antropología y Arqueología Prehistóricas celebrado en Copenhague al que asisten Rogelio de Inchaurrendieta (ingeniero de caminos), Juan Vilanova y Francisco M<sup>a</sup> Tubino. José Vilanova se inscribe como correspondiente. Juan Vilanova defendió por primera vez a nivel internacional la propuesta de Casiano de Prado de que existiera una Edad del Cobre previa a la del Bronce, mientras que Inchaurrendieta dio a conocer lo que posteriormente se conoció como "cultura de El Argar".</p> <p>Juan de Dios de la Rada (1827-1901) y Juan Antonio Malibrán forman una Comisión del Museo Arqueológico Nacional que recorre las provincias de Asturias, Cantabria, León, Palencia, Toledo, Alicante y Murcia. En Asturias prospectaron el dolmen de Cangas, así como visitaron la Cueva del Milagro donde intentaron conseguir otro cráneo como el que Schulz había depositado en la Escuela de Minas, consiguiendo uno por donación de José V. de Argüelles, noble e ilustrado propietario de Infiesto, junto con otros objetos.</p>	<p>Gabriel de Mortillet expone en la Academia de Ciencias francesa su primer proyecto de clasificación prehistórica basado en el concepto de <i>fósil-director</i>.</p> <p>Paul Broca realiza un primer estudio del cráneo neandertaliense de Gibraltar a partir de unas fotografías enviadas por Busk.</p> <p>Tras asistir al congreso de Copenhague, Juan Vilanova y Tubino visitan museos de Dinamarca y Suecia y realizan excursiones arqueológicas a Roskilde, Istad, Lund, Estocolmo, Valdevala y Upsala. Dichos viajes favorecerá que ambos investigadores maduren en su formación como prehistoriadores. En la memoria presentada tras su llegada (1871), los autores hicieron un cálido homenaje a Prado.</p> <p>José Villaamil y Castro analiza las "Antigüedades prehistóricas de Galicia" en <i>El Arte en España</i>. De gran interés por los datos que aporta, concede escasa antigüedad a todo lo prehistórico.</p>
1870	<p>El ingeniero de minas Recaredo de Garay y Anduaga (?-1877) publica, en <i>Boletín-Revista de la Universidad de Madrid</i> un artículo titulado "Historia sobre los hallazgos de unos mazos de diorita". Asimismo remite un largo trabajo a la <i>Revista de España</i> sobre "El hombre prehistórico" donde desde una óptica claramente evolucionista, da un repaso general a los estudios prehistóricos que se habían hecho en España hasta esos momentos, uniéndose a las tesis propuestas por Prado de que en España se pasó del Neolítico a la Edad del Cobre antes que a la del Bronce. A ello hay que sumar las numerosas donaciones que hizo al Museo Arqueológico Nacional. Por otra parte, el 22 de diciembre, Eduardo Saavedra (1829-1912) y Cayetano Rossell (1816-1883) firman un informe en que solicitan que sea admitido en la Real Academia de la Historia como correspondiente por sus descubrimientos de Arqueología Prehistórica en la provincia de Huelva, especialmente los criaderos meta-</p>	<p>Guillermo Macpherson empieza a divulgar los resultados de las excavaciones que había realizado en la Cueva de la Mujer (Alhama de Granada).</p> <p>Ricardo Becerro de Bengoa y Sotero Manteli inician sus prospecciones de monumentos megalíticos en el País Vasco. En años posteriores Ladislao Velasco y Juan Apraiz llevaron a cabo importantes trabajos en este campo.</p>

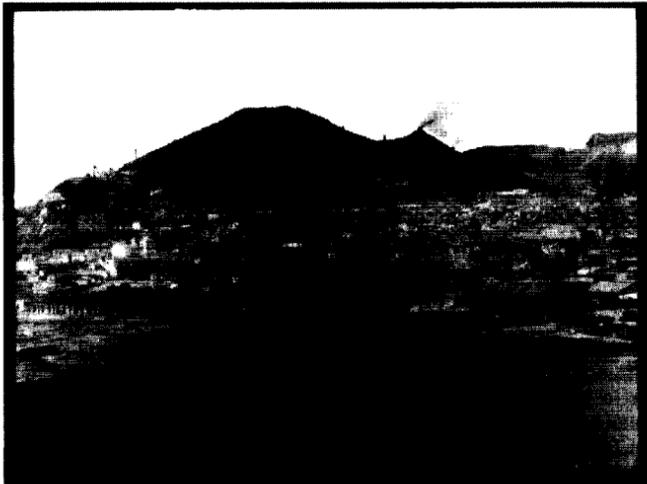
	líferos de cobre. Le achacan, como "defecto", que sea evolucionista, si bien de "tolerable sentido". Se da a conocer en <i>Revista Minera</i> el hallazgo de diversos útiles de la Edad de Piedra en York (p. 63). En el verano, Juan Vilanova y Amalio Maestre visitan los "depósitos de huesos" de la provincia de Palencia, que en realidad eran ricos yacimientos arqueológicos que estaban siendo expoliados para ser vendidos en Francia para el refinado del azúcar. Mientras que Vilanova piensa que son de cronología prehistórica, Maestre opina que son romanos y posteriores.	
1871	El ingeniero de minas Emilio Huelín, en un artículo sobre Paleontología y Darwinismo publicado en <i>El Cronicon Científico</i> , trata sobre el polémico tema del evolucionismo. Recaredo de Garay estudia con Juan Vilanova la estación prehistórica de Argecilla (Guadalajara), que había sido descubierta por el farmacéutico local, Nicanor de la Peña. Asimismo, Garay publica en <i>Revista de España</i> un artículo titulado "El hombre prehistórico" donde, desde un punto de vista claramente evolucionista, da un repaso general a los estudios prehistóricos que se habían hecho en España hasta esos momentos. Por otra parte, ofrece al Museo Arqueológico Nacional cuatro martillos líticos de minas procedentes de la explotación de cobre de Monte Romero (Almonáster, Huelva) a cambio de otros de Cerro Muriano que habían sido donados por Tubino. Al no aceptar el Ministerio el cambio propuesto, Garay retiró su depósito. En <i>Revista Minera</i> se da a conocer el hallazgo de yacimientos palafíticos en Austria (p. 398). V Congreso Internacional de Antropología y Arqueología Prehistóricas celebrado en Bolonia al que asisten José Vilanova y Manuel Rodríguez-Ferrer. Juan Vilanova y Tubino participaron como correspondientes. Guillermo Macpherson envió al congreso objetos procedentes de la Cueva de la Mujer. Se crea la Sociedad Arqueológica Valenciana en la que participa José Vilanova, quien luego llegó a ser Ingeniero Jefe del distrito de Valencia. José realizó numerosas excavaciones en el área valenciana.	Se crea la Sociedad Española de Historia Natural, que acogerá en su seno desde el principio a la ciencia prehistórica. Darwin aplica la teoría de la evolución al hombre en <i>The Descent of Man</i> . El afamado teólogo conservador Francisco Javier Caminero y Muñoz arremete desde <i>Revista de España</i> contra los estudios prehistóricos así como contra sus protagonistas. Crítica a Juan Vilanova por su postura no evolucionista, pero favorable a los estudios prehistóricos, y a Recaredo de Garay por su evolucionismo. Carlos Ribeiro presenta una Memoria en la Real Academia de Ciencias de Lisboa en la que defiende la existencia de útiles líticos terciarios en Otta. Pere Alsius excava la cueva de Bora Gran (Seriñá, Gerona), que conocía por investigaciones realizadas por el padre José Catá en 1866. Igualmente inicia la publicación de una serie de artículos en <i>La Renaxensa</i> que resultaron muy útiles para una mayor comprensión del Paleolítico de la zona.
1872	En <i>Revista Minera</i> se dan a conocer los estudios de antropología prehistórica que estaba realizando Broca en París, se informa de la creación de la Sociedad Española de Historia Natural (pp. 71-73), y se notificaba la existencia de un yacimiento de la Edad de Piedra en Francia. Juan Vilanova y Piera publica <i>Origen, Naturaleza y Antigüedad del Hombre</i> , obra repleta de noticias y en la que se informa de la labor que en este campo estaban llevando a cabo los ingenieros de minas. Entre otras cosas, trata del descubrimiento realizado por Rúa Figueroa de bastantes hachas, a las que cataloga como neolíticas. Estas informaciones las repetirá en diversos artículos, en revistas como <i>Anales de la Sociedad Española de Historia Natural</i> y <i>Museo Español de Antigüedades</i> . En ellas utiliza por primera vez el término Mesolítico como período intermedio entre el Paleolítico y el Neolítico. Muere Amalio Maestre, dejando una rica colección de objetos arqueológicos (Vd. Necrología en <i>Revista Minera</i> (pp. 81-82)). Aparece en las minas de Palazuelo, cerca de la antigua <i>Cástulo</i> , un bajo-relieve toscano representando a unos mineros con sus herramientas, que es publicado por primera vez por Rodríguez de Berlanga (1825-1909) en su <i>Hispaniæ antromanæ syntagma</i> (1884-686). Hoy en día se encuentra depositado en el Museo de Minería de Bochum (Alemania)	VI Congreso Internacional de Antropología y Arqueología Prehistóricas en Bruselas donde se debate la cuestión del hombre terciario. Por parte española asistieron Juan Vilanova y Francisco Tubino. Delgado Jugo, Modesto de la Fuente y Maffiote participaron como correspondientes. Ribeiro defendió con vehemencia la existencia del hombre terciario en Portugal.
1873	Una instrucción, que acompaña al Decreto del 28 de marzo para llevar a cabo el estudio y trazado del Mapa Geológico de España, incluye el estudio y catalogación de los objetos pertenecientes a la Antigüedad que se encuentren en las excavaciones de las minas y cavernas u otros trabajos subterráneos cuando se realicen las descripciones geológico-industriales de cada provincia.	José Joaquín Landerer (1841-1922), discípulo de Juan Vilanova, da a la imprenta un "Cuadro sinóptico de los tiempos primitivos" en los <i>Anales de la Sociedad Española de Historia Natural</i> . Se inicia la publicación de <i>Revista de</i>

	Emilio Huelín inicia las primeras traducciones de la obra de Ferdinand Zirkel <i>Die mikroskopische bestchaffenheit der mineralien</i> . En ella se sientan las bases para el desarrollo de los estudios petrográficos en España. En <i>Revista Minera</i> se informa de la creación de la Sociedad Española de Historia Natural, dando cuenta del contenido del primer tomo de los Anales en donde se encuentra un artículo de Vilanova sobre la época prehistórica en España. En este año se realiza la Exposición Internacional de 1873, incluyéndose en la sección segunda (Minería). Grupo séptimo, los "Materiales Prehistóricos". El geólogo Tomás Llorente encuentra diversos restos prehistóricos en la cueva de Solana de la Angostura cuando estaba prospectándola para su aprovechamiento minero.	<i>Antropología</i> , órgano de la Sociedad Antropológica Española, en la que se dará amplia cabida a los estudios prehistóricos. En la Exposición Internacional de Viena se presentaron unos vaciados de las esculturas del Cerro de los Santos y aunque Salvador Sanpere i Miquel (1840-1915) motivó a los arqueólogos para que las apreciaran, no tuvo ningún éxito.
1874	Rúa Figueroa en un artículo publicado en <i>Revista Minera</i> bajo el título de "La Minería y la Metalurgia españolas en la Exposición Universal de Viena" trata de los descubrimientos en el Cerro de los Santos, del corte geológico-prehistórico realizado por Rotondo en San Isidro, planos de las Minas de Riotinto y de otros yacimientos de valor arqueológico. En el apartado de Bibliografía de la misma revista se cita a <i>Crania Ethnica</i> de A. De Quatrefages y de E.T. Hamy (1842-1908). Juan y José Vilanova asisten al VII Congreso Internacional de Antropología y Arqueología Prehistóricas celebrado en Estocolmo. Gabriel Puig y Larraz (1851-1917) ingresa en la Sociedad Española de Historia Natural.	Francisco María Tubino imparte la asignatura "Ciencia prehistórica" en la Escuela Práctica Libre de Medicina y Cirugía.
1875	En <i>Revista Minera</i> se informa de los hallazgos prehistóricos de Les Corbieres, en la gruta del Mentón en Italia, y en Requena (Valencia). Se da bibliografía sobre prehistoria en un artículo titulado "Guía del geólogo y mineralogista expedicionario de España" y se informa de los artículos de Vilanova en <i>Revista Europea</i> sobre la antigüedad del hombre. Daniel de Cortázar publica las memorias de Cuenca y la del Norte de la Provincia de Almería, demostrando en ambas un gran interés por la Arqueología prehistórica. En la Memoria de Cuenca, elaborada en 1871, señala que la Ciencia prehistórica estaba poco desarrollada en España. Asimismo, expone que había recogido 80 hachas mayoritariamente de sillimanita en la zona. Mientras que en la del Norte de Almería dice que aunque no pudo obtener nada de valor arqueológico, había realizado excavaciones, con criterios estratigráficos, en diversas cuevas intentando encontrar restos de industria humana.	Juan de Dios de la Rada y Delgado hace su presentación en la Real Academia de la Historia con un discurso sobre las esculturas del Cerro de los Santos.
1876	En <i>Revista Minera</i> , Felipe Naranjo y Garza informa del hallazgo de indicios de la existencia humana en época prehistórica en palafitos suizos, del descubrimiento de cuevas con yacimientos prehistóricos en Belfort (Inglaterra) y Enguera (Valencia). En este último yacimiento, Juan Vilanova, tras enterarse ese mismo año de su existencia, se formó una comisión para su estudio. Se informa también de los artículos de Schaffhausen, Vilanova y Virchow en <i>Revista Europea</i> sobre el hombre prehistórico, así como del contenido de los <i>Anales de la Sociedad Española de Historia Natural</i> de ese año, donde se contiene un artículo de Vilanova sobre Prehistoria y se comenta un libro sobre <i>Los antepasados de Adán. Historia del hombre fósil</i> .	Creación en París de la Escuela de Antropología en la que Mortillet imparte la enseñanza de la prehistoria. VIII Congreso Internacional de Antropología y Arqueología Prehistóricas celebrado en Budapest. El naturalista Salvador Calderón y Arana (1853-1911), en una intervención en la Sociedad Española de Historia Natural, comunica que había buscado huesos fósiles humanos en cuevas siguiendo las indicaciones de Casiano de Prado, estando plenamente convencido de la existencia del hombre en España durante el Cuaternario. Gregorio Chil y Naranjo publica el primer tomo de los <i>Estudios históricos, climatológicos y patológicos de las Islas Canarias</i> que, por su carácter evolucionista, tendrá gran contestación en ambientes conservadores.
1877	Daniel de Cortázar (1844-1927) da a la imprenta la <i>Descripción física, geológica y agrológica de la provincia de Valladolid</i> , donde trata de los "depósitos de huesos" como el que existía en Peñafiel, a los que considera, conjuntamente con los de Palencia, basureros de época romana.	

1878	<p>En <i>Revista Minera</i> se da cuenta de un descubrimiento prehistórico en las turberas de Tlichte y del descubrimiento de una ánfora romana en la mina Oriolense. Se publica un artículo sobre la "Edad del Hombre" favorable a Vilanova y contrario a Mortillet y se inicia otro sobre "La Edad del Bronce" de la pluma de Eugenio Bournouf.</p> <p>Los ingenieros de minas belgas Enrique Siret (1857-1934) y Antonio Petre llegan a España contratados por la "Compagnie Minière de la Province d'Almería", Compañía francesa que se había hecho cargo del desagüe del Jaroso en 1877. Se lleva a cabo una exposición arqueológica en Valencia en la que los únicos objetos de valor prehistórico existentes son los aportados por José Vilanova y por Miguel Velasco. José Vilanova toma postura antidarwinista en una conferencia pronunciada en el S.A.V.</p>	<p>Congreso Internacional de Antropología Prehistórica en la Exposición Universal de París de ese año a la que acude Tubino como delegado de la Sociedad Española de Antropología. Por parte española se presentaron colecciones arqueológicas destacándose grandes ilustraciones de dólmenes vascos, vaciados de las esculturas del Cerro de los Santos y objetos de la Ereta del Pedregar (Valencia).</p> <p>Marcelino Sanz de Sautuola descubre las pinturas de Altamira.</p>
1879	<p>En <i>Revista Minera</i> se continúa con el artículo de Bournouf sobre "La Edad del Bronce", se informa de los hallazgos prehistóricos de Caldas de Malavella, de la existencia de diversos dólmenes en Alava, de un yacimiento presumiblemente neolítico en Carboneros (Jaén) y de otro en Pérejaslavl (Rusia). Asimismo se informa de los problemas que presentan los trabajos romanos de Mina Pompeyo (Linares) y de los restos de ánforas y monedas de cobre y otros objetos que aparecieron en Aguilas, y Eugenio Maffei estudia "La primera comisión para formar el Mapa Geológico de España" (pp. 81-82), que tanta importancia tuvo en las investigaciones arqueológicas en nuestro país. En bibliografía se da cuenta del libro de Juan Catalina titulado La Edad de Piedra.</p> <p>El ingeniero de minas José Vilanova, miembro de la Sociedad Arqueológica Valenciana, publica en las memorias de dicha sociedad un artículo titulado "Los estudios prehistóricos", informando de las actividades que en dicho sentido había realizado en Valencia.</p>	<p>Joaquín Mercader, Conde de Belloch, publica una descripción de los monumentos megalíticos catalanes.</p> <p>Gracias a la labor de naturalistas canarios, como Chil y Naranjo, y a la decidida influencia de los franceses Sabin Berthelot y René Vernau echa a andar el Museo Canario, institución que tendrá suma importancia en el estudio de las culturas prehistóricas isleñas. Ese mismo año Berthelot publica sus <i>Antiquités canariennes</i>.</p>
1880	<p>El ingeniero de minas Ramón Adán de Yarza publica, bajo seudónimo: "Un dolmen de Zaldivia. Consideraciones sobre las sepulturas megalíticas del País Vascongado" en <i>Unión Vasco-Navarra</i>.</p> <p>En <i>Revista Minera</i> se publican artículos que llevan por título "La Edad de Piedra y las supersticiones populares", "El Congreso de Antropología y Arqueología Prehistóricas", "Descubrimiento de un enterramiento antiguo en Muela de Chert", "Regalo de Sautuola a Vilanova" y otro sobre la "Caverna de Santillana del Mar", se informa del hallazgo en el puerto de Cartagena de una barra de plomo con una inscripción, y de un túmulo en Gallegos del Pan (Zamora). En Bibliografía se dan a conocer los libros <i>Refutación a los principios fundamentales de la obra titulada Origen de las especies de Luis Pérez Minguez, Prehistoria y Origen de la Civilización</i> de Manuel de Sales y Ferré y <i>Breves apuntes sobre algunos objetos prehistóricos de la provincia de Santander</i>, de Marcelino Sanz de Sautuola.</p> <p>Amalio Gil y Maestre (1837-1915) da a la imprenta la <i>Descripción física, geológica y minera de la provincia de Salamanca</i>, donde se ocupa de la prehistoria de la zona, así como de antigüedades de época romana.</p> <p>Se celebra en Lisboa el IX Congreso Internacional de Antropología y Arqueología Prehistóricas. El único español fue Juan Vilanova y figuraron como suscriptores su hermano José Vilanova, José Macpherson, Guillermo Macpherson, Manuel Sales y Antonio Sendras. Juan Vilanova defendió, sin éxito, la autenticidad y antigüedad de las pinturas de Altamira. Algo mejor fortuna tuvo en su defensa de la existencia de una Edad del Cobre anterior a la Edad del Bronce. José Vilanova se inscribió en este congreso como correspondiente.</p> <p>En el segundo semestre del año Enrique Siret y Antonio Petre inician sus prospecciones arqueológicas después de que un buscador de tesoros les llevase una serie de objetos encontrados en un lugar próximo a Cuevas. Enrique Siret escribe inmediatamente a su hermano Luis, que aún era estudiante en Lovaina, dándole cuenta de los descubrimientos y mandándole dibujos de las piezas.</p> <p>El naturalista Francisco Quiroga (1853-1894) realiza los primeros estudios</p>	<p>Sautuola publica los resultados de sus investigaciones prehistóricas en Cantabria en sus <i>Breves apuntes sobre algunos objetos prehistóricos de la Provincia de Santander</i> donde por vez primera publica las pinturas de Altamira. Además del yacimiento existente en esta cueva da cuenta de los de Cueva del Cuco, Cueva de San Pantaleón, Cueva de Cobalejos, Cueva Camargo y Cueva de Fuente del Francés. En sus investigaciones le ayudaron Pérez del Molino y Eduardo de la Pedraja.</p> <p>Landerer, tras recibir aviso del párroco Ambrosio Sanz, acude a visitar el yacimiento denominado Muela de Chert, publicando sus conclusiones en <i>La Ilustración Española y Americana</i>.</p> <p>Sale el primer número de la revista <i>Museo Canario</i>, órgano de la institución homónima.</p> <p>Nery Delgado, adjunto de la Comisión de Trabajos Geológicos de Portugal presenta al congreso arqueológico de Lisboa un estudio de la cueva de Furninha donde encontró industria paleolítica y neolítica. El ingeniero de minas portugués Federico de Vasconcellos presentó un estudio acerca de algunos yacimientos prehistóricos del valle del Duero.</p>

	<p>petrográficos de hachas prehistóricas, algunas de ellas pertenecían al ingeniero de minas Daniel Cortázar. Dice Quiroga que el ingeniero de minas Buireo había recogido hachas de nefrita en la localidad madrileña de Prádena del Rincón y pueblos inmediatos. Sus conclusiones las dio a conocer en el <i>Boletín de la Institución Libre de Enseñanza</i>. En la misma revista escribió también Salvador Calderón, en este caso sobre la composición de las hachas de bronce y el porcentaje de estaño que deben contener para denominarlas así.</p>	
1881	<p>En <i>Revista Minera</i> se publica un artículo sobre "Los tiempos prehistóricos en el Maestrazgo" de Landerer, "El Maestrazgo" de Ambrosio Sanz y Manuel de Sales y la "Exposición de Minería, Artes Metalúrgicas, Cerámica y Cristalería" informando que en la sección de Minería podrá formarse una sección arqueológica. Se reproduce una carta de Cartailhac (1845-1921) a Sautuola sobre la "Caverna de Santillana del Mar" y se informa (p. 78) que, según el <i>Eco Minero</i>, había aparecido en la Mina del Rosario en Sierra Almagrera un busto de Diana de barro cocido. Asimismo (p. 36) se da cuenta de la aparición de varios esqueletos en Cueva de la Ciega (Vizcaya).</p> <p>Antonio Petre regresa a Bélgica y llega a Cuevas Luis Siret (1860-1934), una vez que ya ha acabado sus estudios. Los Siret prospeccionan ese mismo año Campos, Tres Cabezas y Fuente Alamo. Cuando se percatan de la importancia de sus hallazgos escriben a Juan Vilanova, quien les hace una visita tras asistir al Congreso de Argel de la Asociación Francesa para el Progreso de las Ciencias, y prospecciona los yacimientos con ellos.</p> <p>El ingeniero de minas José Vilanova da cuenta en las <i>Memorias de la Sociedad Arqueológica Valenciana</i> de las últimas investigaciones prehistóricas que había realizado en el territorio.</p>	<p>En el verano, Juan Vilanova prospecciona de nuevo las cuvas del Parpalló y Cova Negra. Durante el mes de diciembre estudia el yacimiento Calcolítico de Serreta la Vella (Monóvar, Alicante).</p> <p>El médico y naturalista gerundense Manuel de la Chía da a conocer los objetos prehistóricos y circunstancias de los hallazgos por él realizados en el Puig de las Animas (Caldas de Malavella) en la <i>Revista de Ciencias Históricas</i>. En la misma revista Salvador Sanpere escribe una "Contribución al estudio de los monumentos megalíticos ibéricos" donde no se contenta con describirlos, sino que plantea interesantes hipótesis.</p> <p>Juan Rubio de la Serna (1834-1917) encuentra y da a conocer una necrópolis ibérica en memoria publicada por la Real Academia de la Historia en 1888. Este hallazgo tuvo gran repercusión, y facilitó el conocimiento, pocos años después, de la cultura ibérica.</p>
1882	<p>El ingeniero de minas Luis Mariano Vidal (1842-1922) entra en contacto con los temas de Prehistoria en el "Estudio geológico de la Estación Termal de Caldas de Malavella". Para Manuel Cazorro (1924) fue uno de los grandes prehistoriadores del NE de España "pudiendo decirse que fue el primero que lo realizó en Cataluña con verdadero criterio y método científico".</p> <p>Daniel de Cortázar y Manuel Pato (1838-1916) publican la <i>Descripción física, geológica y agrológica de la Provincia de Valencia</i>, donde copian con palabras textuales de Juan Vilanova, lo que éste comenta sobre la prehistoria de la provincia, especialmente en las cuevas del Mondúber.</p> <p>Juan Vilanova vuelve a visitar a los Siret aprovechando las celebraciones que en honor de ambos hermanos se hacían en Cuevas, tras la traída de aguas a la localidad, obras que los Siret habían dirigido.</p>	<p>El ingeniero de obras públicas francés Eduardo Harlé (1850-1922) investiga la cueva Bora Gran (Seriñá, Gerona) obteniendo unas laminillas que llevó a Mortillet, quien las clasificó como magdalenenses.</p>
1883	<p>Se realiza la Exposición de Minería del Parque del Retiro de Madrid, donde se expusieron numerosísimas antigüedades. Entre todas ella destacaba la tabla de bronce encontrada en Aljustrel (donde se contiene la ley que regía la mina Vipasca), picos de hierro de los utilizados por mineros romanos, un cesto de sacar mineral y tornillos egipcios. También se presentaron colecciones prehistóricas. Las paleolíticas eran de Juan Vilanova, Marcelino Sanz de Sautuola y Francisco Cánovas (1820-1904). Las neolíticas pertenecían a Juan Vilanova, Francisco Cánovas, Sociedad Arqueológica de Valencia (José Vilanova), Comisión de Monumentos de Badajoz, Daniel Cortázar y Escuela de Minas de Madrid. De la Edad de los Metales se exhibieron algunos objetos de la Escuela de Minas, así como un ancla de plomo romana extraída en la draga del puerto de Cartagena y donada al Museo Arqueológico Nacional por el ingeniero de minas Luis de la Escosura (1821-1904). Su interés por la Arqueología le llevó a hacer un estudio de las conducciones de agua de época romana. En la comisión organizadora participaron personas interesadas por la Arqueología, como Amalio Gil Maestre, y en el jurado de la misma participó Juan de</p>	

	<p>Dios de la Rada. De esta exposición José Vilanova publicó una <i>Memoria de los expositores valencianos en la Exposición Nacional de Minería, Artes Metalúrgicas, Cerámica, Cristalería y Aguas Minerales</i> de la que dio cuenta <i>Revista Minera</i> (p. 686).</p> <p>Enrique y Luis Siret construyen su residencia en Parazuelos, ubicada en las proximidades de una mina de plomo argentífero que habían adquirido el año anterior. La proximidad del yacimiento calcolítico epónimo de Parazuelos facilitará que poco después lo descubran. La lista de yacimientos que encuentran ese año y los siguientes tiene fama internacional: El Argar, Fuente Bermeja, Lugarico Viejo, etc. El primero de ellos ha dado lugar a la determinación de la "cultura argárica" una de las más importantes del Bronce Medio de la Península Ibérica y de Europa.</p>	
<p>1884</p>	<p>En <i>Revista Minera</i> (pp. 30-33) se publican los premios otorgados por el Jurado de la Exposición de Minería, entre los que se mencionan por las colecciones arqueológicas de Casimiro Alonso (León), Museo Arqueológico de León, Marcelino Sanz de Sautuola (Cantabria), Ingeniero Jefe de Minas de Badajoz, Benito Gasa (Toledo), Juan Vilanova, los ingenieros de minas Guillermo López Bienert y Daniel de Cortázar, Museo Arqueológico Nacional, etc. En p. 209 se comenta la recepción de Federico Botella en la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, siendo contestado por Juan Vilanova y Piera. Ambos defendieron las teorías de Elie de Beaumont (1798-1874) sobre la formación de las montañas, lo que no es extraño, si tenemos en cuenta que Juan Vilanova fue alumno de Beaumont en la Escuela de Minas de París durante su estancia para ampliar estudios en Europa (1849-1853).</p> <p>Ramón Adán de Yarza ofrece numerosos datos arqueológicos en la "Descripción física y geológica de la provincia de Guipúzcoa".</p> <p>Alex Boek, director de las Minas de Mazarrón y gran amigo de los Siret, realiza importantes descubrimientos arqueológicos en el Coto Fortuna. El más importante de todos ellos fue el lavadero romano, que tuvo gran influencia en posteriores publicaciones. Este descubrimiento tendrá inmediato eco en los círculos científicos españoles como se refleja en los <i>Anales de la Sociedad Española de Historia Natural</i> de ese mismo año por una intervención de Odón del Buen.</p>	
<p>1885</p>	<p>Ramón Adán de Yarza publica <i>Descripción física y geológica de la provincia de Alava</i>, donde se incluye un apéndice titulado "Dos palabras acerca de lo prehistórico en Alava". En él cita los descubrimientos realizados en la Dehesa de San Bartolomé y algunas tumbas encontradas en las proximidades de Villarreal que clasifica como neolíticas. Clasifica como de la Edad del Bronce diversos monumentos megalíticos.</p> <p>El profesor de la Escuela Técnica Superior de Estocolmo, G. Nordenström, publica el libro titulado <i>Om Berghshandteringen</i> donde trata sobre la minería en España. El autor había asistido a la Exposición de Minería de 1883 y publica noticias sobre la minería española en la Antigüedad, mostrando en una lámina restos del lavadero romano de Coto Fortuna. (Figs. 6y7).</p>  <p>Fig. 6 - Croquis del lavadero romano de Coto Fortuna, tomado de "Criaderos de hierro de la región de Murcia", de D. Fernando B. Villasante (1913) p. 163</p>	<p>El religioso escolapio Eduardo Llanas (1843-1904) publica en <i>Crónica Científica</i> el descubrimiento que había realizado en Vilanova y Geltrú, consistente en varias hachuelas de diorita y cuentas de piedra junto a huesos humanos.</p> <p>Leandro de Saralegui escribe un artículo sobre los castros gallegos desde diversas ópticas: arquitectónica, cultural, etnológica, antropológica, etc...</p> <p>Se crea la Sociedad Arqueológica de Carmona bajo el impulso de Jorge Bonsor (1855-1930) y Juan Fernández López (1850-1925).</p> <p>Se celebra en Madrid el I Congreso Católico Español, en la que debaten, por un lado Juan Vilanova y, por otro, el arzobispo de Sevilla Zeferino González. Ambos mantuvieron posturas próximas al fixismo, pero mientras el primero defendía una alta antigüedad del ser humano, el arzobispo no lo admitía.</p>

	 <p>Fig.7 - Mazarrón a principios de siglo, foto cortesía de D. Mariano Carlos Guillén</p> <p>En <i>Revista Minera</i> se trata (p. 48) de la reunión mantenida el 4 de febrero en la Sociedad Española de Historia Natural, donde intervinieron destacados ingenieros de minas, y Juan Vilanova comentó los descubrimientos prehistóricos que recientemente se habían realizado en una cueva de Alcoy y en varias de la provincia de Gerona; en (p. 80) se da noticia del libro <i>Estudio prehistórico de la Cueva del Tesoro</i> que el año anterior había publicado Eduardo J. Navarro.</p>	
<p>1886</p>	<p>Luis Mariano Vidal publica <i>Reseña geológico y minera de la provincia de Gerona</i> donde, en el estudio del Cuaternario, se describen numerosas estaciones arqueológicas en dicho territorio.</p> <p>Joaquín Gonzalo y Tarín (1838-1910) publica la <i>Descripción física, geológica y minera de la provincia de Huelva</i>, cuyo segundo tomo, con interesantes dibujos sobre minería romana, aún hoy mantiene una gran actualidad, habiendo sido copiados por grandes especialistas en la materia, como Luis Siret.</p> <p>En <i>Revista Minera</i> (p. 72) se informa del libro publicado el año anterior por Nordenström.</p>	<p>Antonio Cánovas del Castillo, como presidente de la Real Academia de la Historia, reconoce a la Ciencia prehistórica de un modo oficial en dicha institución.</p> <p>Emilio Cartailhac publica <i>Les Âges préhistoriques de l'Espagne et Portugal</i>, con prólogo de Quatrefages. Esta obra ofrece por vez primera una visión general de la prehistoria española desde la óptica de una pluma francesa. La obra, de gran amplitud y buen número de ilustraciones en blanco y negro, menciona e ilustra los martillos de las minas de cobre de Rodeo del Madroño (Huelva), Milagro (Asturias) y Cerro Muriano.</p> <p>Se crea la Sociedad de Excursiones de Sevilla, bajo la tutela de Manuel Sales y Ferré, cuyas actividades ayudaron al descubrimiento de importantes yacimientos arqueológicos.</p>
<p>1887</p>	<p>Enrique y Luis Siret publican en francés <i>Las primeras edades del metal en el Sudeste de España</i>, publicada en 1890 tras obtener el premio Martorell. La traducción al castellano la realizó el también ingeniero de minas Silvino Thós y Codina (1843-1911). Poco después se concederá a ambos hermanos la medalla de oro de la Exposición Internacional de Toulouse por dicha obra.</p>	<p>Se descubre fortuitamente la mandíbula neandertaloide de Bañolas (Gerona), que fue rápidamente apreciada por Pere Alsius.</p> <p>Villaamil y Castro publica un artículo sobre "La edad prehistórica en Galicia" en la revista <i>Galicia</i>.</p> <p>Se inicia la excavación de la necrópolis fenicia de Punta de Vaca (Cádiz) con motivo de la exposición marítima de ese año.</p>

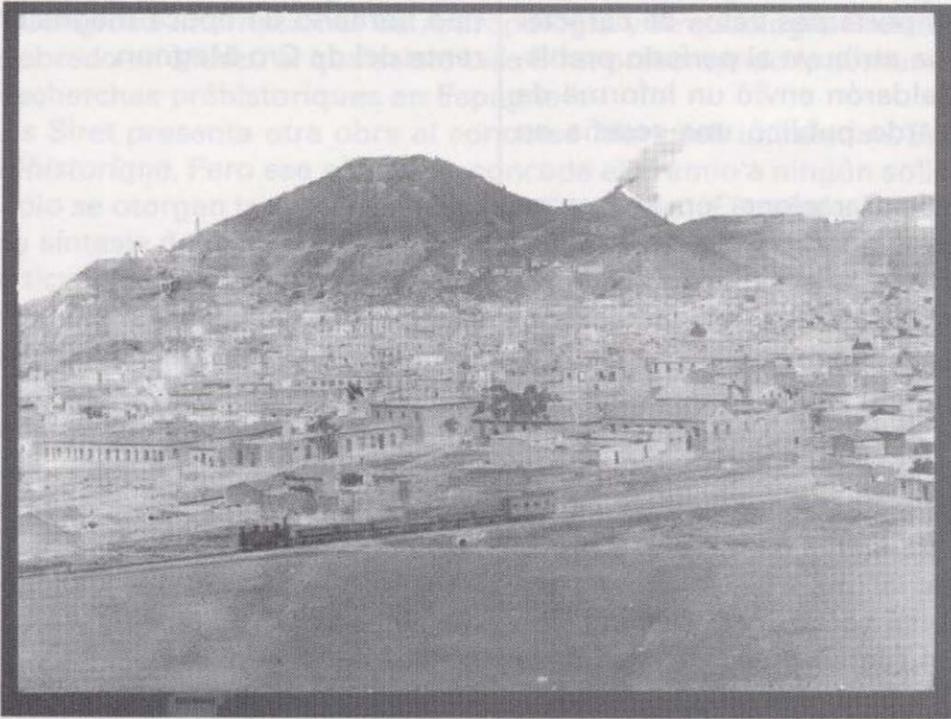


Fig.7 - Mazarrón a principios de siglo, foto cortesía de D. Mariano Carlos Guillén

En *Revista Minera* se trata (p. 48) de la reunión mantenida el 4 de febrero en la Sociedad Española de Historia Natural, donde intervinieron destacados ingenieros de minas, y Juan Vilanova comentó los descubrimientos prehistóricos que recientemente se habían realizado en una cueva de Alcoy y en varias de la provincia de Gerona; en (p. 80) se da noticia del libro *Estudio prehistórico de la Cueva del Tesoro* que el año anterior había publicado Eduardo J. Navarro.

	<p>Fig.7 - Mazarrón a principios de siglo, foto cortesía de D. Mariano Carlos Guillén</p> <p>En <i>Revista Minera</i> se trata (p. 48) de la reunión mantenida el 4 de febrero en la Sociedad Española de Historia Natural, donde intervinieron destacados ingenieros de minas, y Juan Vilanova comentó los descubrimientos prehistóricos que recientemente se habían realizado en una cueva de Alcoy y en varias de la provincia de Gerona; en (p. 80) se da noticia del libro <i>Estudio prehistórico de la Cueva del Tesoro</i> que el año anterior había publicado Eduardo J. Navarro.</p>	
<p>1886</p>	<p>Luis Mariano Vidal publica <i>Reseña geológico y minera de la provincia de Gerona</i> donde, en el estudio del Cuaternario, se describen numerosas estaciones arqueológicas en dicho territorio.                  Joaquín Gonzalo y Tarín (1838-1910) publica la <i>Descripción física, geológica y minera de la provincia de Huelva</i>, cuyo segundo tomo, con interesantes dibujos sobre minería romana, aún hoy mantiene una gran actualidad, habiendo sido copiados por grandes especialistas en la materia, como Luis Siret.                  En <i>Revista Minera</i> (p. 72) se informa del libro publicado el año anterior por Nordenström.</p>	<p>Antonio Cánovas del Castillo, como presidente de la Real Academia de la Historia, reconoce a la Ciencia prehistórica de un modo oficial en dicha institución.                  Emilio Cartailhac publica <i>Les Âges préhistoriques de l'Espagne et Portugal</i>, con prólogo de Quatrefages. Esta obra ofrece por vez primera una visión general de la prehistoria española desde la óptica de una pluma francesa. La obra, de gran amplitud y buen número de ilustraciones en blanco y negro, menciona e ilustra los martillos de las minas de cobre de Rodeo del Madroño (Huelva), Milagro (Asturias) y Cerro Muriano.                  Se crea la Sociedad de Excursiones de Sevilla, bajo la tutela de Manuel Sales y Ferré, cuyas actividades ayudaron al descubrimiento de importantes yacimientos arqueológicos.</p>
<p>1887</p>	<p>Enrique y Luis Siret publican en francés <i>Las primeras edades del metal en el Sudeste de España</i>, publicada en 1890 tras obtener el premio Martorell. La traducción al castellano la realizó el también ingeniero de minas Silvino Thós y Codina (1843-1911). Poco después se concederá a ambos hermanos la medalla de oro de la Exposición Internacional de Toulouse por dicha obra.</p>	<p>Se descubre fortuitamente la mandíbula neandertaloide de Bañolas (Gerona), que fue rápidamente apreciada por Pere Alsius.                  Villaamil y Castro publica un artículo sobre "La edad prehistórica en Galicia" en la revista <i>Galicia</i>.                  Se inicia la excavación de la necrópolis fenicia de Punta de Vaca (Cádiz) con motivo de la exposición marítima de ese año.</p>

1888	El ingeniero de minas Gonzalo Tarín da a la imprenta la <i>Historia de la minería de la provincia de Huelva</i> , dando importantes datos de carácter arqueológico, mencionando yacimientos que atribuye al período prehistórico, fenicio y época romana. Salvador Calderón envió un informe de este libro a Hamy, quien dos años más tarde publicó una reseña en <i>L'Anthropology</i> . Se lleva a cabo la Exposición Universal de Barcelona, en la que se reservó una sala para "las artes retrospectivas". Los hermanos Siret llevaron algunas muestras arqueológicas a la Exposición Universal de Barcelona, ganando una medalla de oro.	Descubrimiento del Hombre de Chancelade, tipo humano de época magdaleniense diferente del de Cro-Magnon.
1889	Tras informe del ingeniero de minas italiano Del Re, Juan Vilanova describe el hallazgo del yacimiento de la colina de La Magdalena, en la zona de Linares. Luis L'Aunay, profesor de la Escuela de Minas de París, escribe en los <i>Annales des Mines</i> una "Mémoire sur l'Industrie du Cuivre dans la Région d'Huelva" en la que, apoyado por la importancia de la zona minera en la Antigüedad, al igual que lo habían hecho antes Deligny, Rúa de Figueroa y Garay, identifica la zona con el Tharsis bíblico, y reproduce el sistema de extracción de época romana en Santo Domingo (Portugal).	Piette (1827-1906) define el Aziliense, situándolo cronológicamente entre el Paleolítico y el Neolítico. X Congreso Internacional de Antropología y Arqueología Prehistóricas celebrado en París al que acuden Juan Vilanova y Chil y Naranjo. Sales y Ferré figuró como correspondiente. Juan Vilanova ingresa en la Real Academia de la Historia desarrollando en su seno, y hasta su próxima muerte, una importante labor en pro de lo prehistórico español. Descubrimiento del yacimiento sevillano de El Coronil, con estudios de Candáu, Calderón y Arana, Sales y Ferré y Vilanova. Francisco Quiroga presenta un estudio sobre la composición de las hachas de cobre de este yacimiento en los <i>Anales de la Sociedad Española de Historia Natural</i> .
1890	En <i>Revista Minera</i> (pp. 381-383) Roman Oriol publica un artículo sobre la Mina Profunda, donde se hicieron importantes hallazgos arqueológicos. El naturalista Antonio Machado dona al Museo Arqueológico Nacional un punzón de hueso hallado en una cueva de Guadalcanal y de un catino de barro saguntino hallado en la mina "La Esperanza" de Huelva. Luis Siret, una vez que su hermano ha regresado a Bélgica, se queda solo en sus investigaciones arqueológicas. Emprende entonces un vasto plan de excavaciones que incluye yacimientos de la más diversa tipología y épocas: Cueva de Pernerías, Cueva Palomaricos, Cueva Bermeja, Cueva del Serrón, poblado y necrópolis de Los Millares, dolmen de Los Eriales (Granada) y necrópolis de Villaricos.	Antonio González y García de Meneses presenta una comunicación a la Sociedad Española de Historia Natural sobre "El período del cobre en la provincia de Huelva" donde defiende la prelación del cobre al bronce. Comenta su autor que a veces se encontraban en las minas huesos de mineros prehistóricos, al igual que martillos de piedra pulimentada, en algunos casos de proporciones colosales. También menciona que algunas veces se descubrían estos restos humanos junto con útiles de cobre puro.
1891	Daniel Cortázar realiza la <i>Descripción física y geológica de la provincia de Segovia</i> ocupándose de los útiles prehistóricos de sillimanita. Copia en la obra (pp. 195-196) lo dicho por Casiano de Prado en su memoria de 1854 sobre las cuevas de Pedraza, cita la Cueva de la Griega (p. 197), situada en las proximidades de Pedraza, en la que Areitio y Quiroga habían descubierto "restos indeterminables de huesos y cacharros de barro", y afirma (p. 211) que los romanos fueron los primeros en beneficiar los criaderos de Otero de Herreros.	Eugène Dubois (1858-1940) busca y encuentra en Java restos de lo que él denominaría <i>Pitecanthropus erectus</i> , por considerarlo intermedio entre los primates y el ser humano. Juan Vilanova y Juan de Dios de la Rada publican <i>Geología y Protohistoria Ibérica</i> que constituye el mejor resumen de la época acerca de lo que se conocía a finales del siglo XIX sobre prehistoria española. Juan Vilanova descubre el yacimiento de Cabezo Redondo (Villena) cuando estaba completando sus estudios geológicos de la provincia de Alicante.
1892	Ramón Adán de Yarza, en la <i>Descripción Física y Geológica de la provincia de Vizcaya</i> (pp. 120-121), da varios datos arqueológicos. Luis Siret publica en <i>L'Anthropologie</i> "Nouvelle campagne de recherches	Bajo el patrocinio de Modesto del Valle, Conde de Lersundi, se inician las excavaciones de la cueva de Aitzbitarte IV. Dicha cueva

	archéologiques en Espagne" con una síntesis de la prehistoria española. XI Congreso Internacional de Antropología y Arqueología Prehistóricas celebrado en Moscú al que asiste Luis Siret presentando la comunicación "Recherches préhistoriques en Espagne". Luis Siret presenta otra obra al concurso Martorell intitulada <i>L'Espagne préhistorique</i> . Pero ese año no se concede el premio a ningún solicitante y sólo se otorgan tres accésit, uno de ellos a Siret. El trabajo consistía en una síntesis de todo lo prehistórico que se conocía en España, haciendo particular hincapié en la minería prehistórica. La obra está aún inédita, si bien se publicó al año siguiente un extracto en la <i>Revue des Questions Scientifiques</i> y han aparecido impresos en alguna ocasión, de forma suelta, alguna de las maravillosas láminas a color y blanco y negro que se incluían. Igualmente, en el curso de Verano de la Complutense de 1996, sede de Purchena, Carlos Herguido ha demostrado que, tras la muerte de Siret, Guillermo Gossé publicó algún fragmento de la obra con su nombre en <i>Ampurias</i> .	volvió a ser excavada entre 1896 y 1901 por parte de Pedro Manuel de Soraluce a quien en 1902 se le unió Gonzalo de Repáraz y Rotondo Nicolau. Julián de Apraiz realiza un estudio sobre todo lo conocido acerca de "Los dólmenes alaveses" en <i>Euskal-Erria</i> . Descubrimiento de la Cueva de Segóbriga y primera visita de Capelle a la misma. Reúne este jesuita un importante equipo multidisciplinar y envía cartas del hallazgo a los más importantes prehistoriadores, como Cartailhac, quien se hace eco del descubrimiento en <i>L'Anthropologie</i> del año siguiente. Recordemos que en el siglo anterior Cabezo del Griego había sido estudiado por José Córnode Saavedra, realizando los dibujos de las ruinas de Segóbriga el arquitecto Melchor de Prado, padre de Casiano. Se lleva a cabo el Congreso Católico de Sevilla donde la jerarquía eclesiástica defiende los estudios prehistóricos, pero con el fin de que se demuestren sus tesis creacionistas y antidarwinistas. Este hecho no es sino la manifestación de lo que habían supuesto los avances geológicos en este campo, los cuales fueron determinando un cambio paulatino en los estudios teológicos sobre el tema, abandonándose en éstos progresivamente las interpretaciones literales a costa de las interpretativas, considerando estilos literarios y contextos culturales.
1893	En <i>Revista Minera</i> (pp. 361-365 y 390-392) se publica un artículo de Alfonso Dory sobre "Las antiguas minas de cobre y cobalto del Aramo, descubiertas por el ingeniero de minas Sr. Van Straalen" y que tuvo amplia repercusión internacional. En la obra <i>Geología y Protohistoria ibéricas</i> de Juan Vilanova y de Juan de Dios de la Rada, entre muchas noticias, se informa que el entonces alumno Domingo de Orueta (1862-1921) tenía depositadas en la Escuela de Minas varias hachas pulimentadas procedentes de Periana. Surge un debate en la Sociedad de Antropología de París sobre la estratigrafía del yacimiento madrileño de San Isidro y de la posición que ocupan en él los útiles prehistóricos. Entonces el barón de Baye lo visita, encontrando útiles musterienses y estratigrafía diferente a la que habían expuesto Prado y Vilanova. Se solicita entonces a Luis Siret que confirme las conclusiones de Baye. Este acude a Madrid recolectando 30 artefactos achelenses, 6 musterienses y uno solutrense.	Muere Juan Vilanova. Ese mismo año aparece su obra póstuma <i>Memoria geognóstica-agrícola y protohistórica de Valencia</i> .
1894	Luis Mariano Vidal estudia las cuevas de la provincia de Lérida dando a la imprenta un folleto sobre <i>Les coves prehistòriques de la provincia de Lleyda</i> . Todas las citadas las clasifica como de neolíticas y se sitúan al Norte de la provincia, en la sierra del Montseny, describiendo la Gruta del Tabaco, Cova de l'Aigua y Cova Negra de Tragó de Noguera. Interesado también por los dólmenes publica un artículo titulado "Más monumentos megalíticos de Cataluña", que aún hoy es de obligada referencia cuando se quieren investigar los dólmenes del Alto Ampurdán. Ambas publicaciones corresponden a conferencias impartidas en instituciones barcelonesas. El ingeniero de minas Gabriel Puig y Larraz publica un importante inventario de las cavernas y simas de España. En p. 1 comenta que fue animado por los ingenieros de minas Daniel Cortázar y Serafín Uhagón, quien ya había recopilado numerosos datos y se los había remitido al sacerdote francés Lacaute.	Piette descubre la Venus de Brassempouy. Dubois publica su descubrimiento de <i>Pitecanthropus erectus</i> en Java, al que sitúa a medio camino entre el mono y el hombre. Dos discípulos de Sales y Ferré ganan el premio convocado por la Sociedad de Excursionistas de Sevilla y el Ateneo de la localidad sobre prehistoria andaluza. Estos fueron Carlos Cañal y Feliciano Candáu. La obra del primero se titulaba <i>Sevilla Prehistórica</i> y la del segundo <i>Prehistoria de la provincia de Sevilla</i> . A mediados de año unos obreros descubren huesos junto con cerámica al terraplenar un terreno para hacer una carretera en la locali-

	Rafael Sánchez Lozano (1854-1922) publica la <i>Descripción física, geológica y minera de la Provincia de Logroño</i> , donde acomete un estudio en profundidad de Cueva Lóbrega y de las excavaciones que en dicha cueva habían realizado Luis Lartet e Ildefonso Zubía a mediados de la década de los 60. Mortillet comenta en la Sociedad Antropológica de París que el yacimiento de San Isidro era el más importante de los existentes en España y como no le convencen los estudios que acababan de hacer de Baye y Siret, comisiona a Gaudry (1827-1908) a quien acompañan Lucas Mallada (1841-1921) y Manuel Cazorro. Juntos elaboran un corte estratigráfico que envían a Marcelin Boule (1861-1942) y que se publica al año siguiente en <i>L'Anthropologie</i> . La presencia de Cazorro suponía una garantía, por cuanto en años anteriores había presentado unas notas acerca de San Isidro en <i>Anales de la Sociedad Española de Historia Natural</i> .	dad de Ciempozuelos. Esta cerámica, de época calcolítica, se hará mundialmente famosa por su tipología.
1895	En el tomo de <i>Revista Minera</i> no hay ninguna cita sobre el tema prehistórico. Ya no existe interés institucional por la Arqueología, aunque siempre habría ingenieros de minas arqueólogos.	E. Riviére descubre la cueva de la Mouthe con pinturas rupestres. Se descubren los famosos bronzes de Costig (Mallorca).
1896	Gabriel Puig y Larraz empieza a publicar un catálogo de las cuevas españolas en los <i>Anales de la Sociedad Española de Historia Natural</i> y en el <i>Boletín Geológico y Minero</i> , comentando aquellas que tenían yacimiento prehistórico conocido. Hizo también una obra donde compendió todos los artículos anteriores. Estos estudios tuvieron rápida trascendencia, así sólo dos años más tarde Chaves realizaría una prospección en cuevas andaluzas previamente citadas. Por otra parte, grandes prehistoriadores del siglo XX, como el abate Breuil (1877-1961), se guiaron por esta obra para sus prospecciones arqueológicas en España.	François Daleau (1845-1927) descubre los grabados de Pair-non-Pair.
1897	Mariano de la Paz Graells (1808-1898) individuo que había formado parte de la Comisión Geológica de España publica <i>Fauna Mastodológica Ibérica</i> , la cual había tardado en ver la luz cerca de 46 años. En ella Gabriel Puig y Larraz incluye un actualizado "Ensayo bibliográfico de Antropología Prehistórica ibérica" y Daniel Cortázar explica el corte de San Isidro. Bernabé y Lentisco, director de <i>El Minero de Almagrera</i> , muestra a Luis Siret el capitel de una columna encontrada en Villaricos. Gabriel Puig y Larraz investiga las "inscripciones ibéricas" de Galicia. Realizó las investigaciones con el cura párroco de Prado y el auxiliar facultativo de minas, Valentín Pellitero. También Puig y Larraz traduce, para el <i>Boletín de la Comisión XXIV</i> (pp. 1-30), un trabajo de Edouard Alfred Martel sobre la "Exploración subterránea de Baleares y Cataluña".	Manuel Cazorro, siguiendo los estudios de Pere Alsius, visita Bora Gran d'En Carreras, recogiendo algunos objetos prehistóricos y revisando los depositados en colecciones de Bañolas. Se descubre la Dama de Elche, que Salomón Reinach inmediatamente relaciona con las esculturas del Cerro de los Santos.
1898	Gabriel Puig y Larraz publica en el <i>Boletín de la Real Academia de la Historia</i> un estudio sobre los "Cantiberonieses" y otro sobre el "Valor métrico de la milla romana".	
1899	Daniel Cortázar realiza estudios petrográficos de hachas pulimentadas. Este profesor de Geología de la Escuela de Minas donaría 18 hachas a dicha institución. Gabriel Puig y Larraz presenta a la Sociedad Geográfica de Madrid unas "Observaciones a la nota del Sr. Eduardo Alfredo Martel acerca de las exploraciones arqueológicas en Baleares y Cataluña".	Jorge Bonsor publica su brillante estudio sobre las colonias agrícolas preromanas del valle del Betis en <i>Revue Archéologique</i> donde recoge todo lo que hasta ese momento se había hecho en la zona de época protohistórica. Este trabajo había sido premiado previamente en el Premio Martorell de 1897 con un accésit.
SIGLO XX	Es importante la labor arqueológica de los ingenieros de minas de principios de siglo. Sin embargo esta labor se fue progresivamente mitigando según se consolidaban los estudios e instituciones arqueológicas. Hoy en día vuelven a conectar ambos cuerpos por la necesidad de multidisciplinariedad e interdisciplinariedad que toda investigación rigurosa	



## REFERENCIAS

AYARZAGÜENA SANZ, Mariano (enero de 1990), "Orígenes de la Arqueología prehistórica en España", *Revista de Arqueología* 105, pp. 16-24, Madrid.

- (1992), *La Arqueología prehistórica y protohistórica española en el siglo XIX*, Tesis doctoral en microfichas, UNED, Madrid.

CARTAILHAC, Emile (1886), *Les âges préhistoriques de l'Espagne et du Portugal, Résultats d'une mission scientifique*, Prefacio de Quatrefages, París.

CAZURRO, M. (1924), *La riqueza en metales preciosos en la España Antigua*, Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona XVIII, Barcelona.

GOBERNA, M<sup>a</sup> Victoria (1986), "Los estudios de prehistoria durante la segunda mitad del siglo XIX y primeros años del XX.- La obra de Luis Siret", *Actas del Congreso-Homenaje a Luis*

Siret (1934-1984), *Cuevas de Alanzora*, Junio de 1984, pp. 29-34, Sevilla.

JOLY, N. *L'homme avant les métaux* Lib. Germer Baillièrre et Cie. París.

PELAYO, Francisco (1995), "Un capítulo en la creación de la Cátedra de Geología y Paleontología de la Universidad Central: La formación científica de Juan Vilanova y Piera en Europa", *Llull*, vol. 18, n<sup>o</sup> 35, pp. 493-516, Zaragoza.

PRADO Y VALLO, Casiano de (1864), *Descripción física y geológica de la Provincia de Madrid*, Junta General de Estadística, Madrid.

PUCHE RIART, Octavio (1994), "La contribución de los ingenieros de minas y naturalistas a la Arqueología española: Los inicios de los estudios prehistóricos en España", *Boletín Geológico y Minero* 104 (3), pp. 94-128, Madrid.

PUCHE RIART, O.; SERRANO VALVERDE, R.; BERNARDEZ GOMEZ, M<sup>a</sup> J.; GUI-SADO DI MONTI, J.C. & CALVO PEREZ, B. (1994), "Análisis sobre el origen de

los materiales arqueológicos del Museo Histórico Minero D. Felipe de Borbón y Grecia, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid", *Boletín Geológico y Minero* 105 (5), pp. 79-90, Madrid.

TUBINO, Francisco María (1868), *Estudios prehistóricos*, Oficina de la Revista de Bellas Artes, Madrid.

VILANOVA Y PIERA, Juan (1872), *Origen, Naturaleza y Antigüedad del Hombre*, Madrid.

VERNEUIL, ED. DE & LARTET, L. (1862-3), "Note sur un sílex taillée trouvé dans le diluvium des environs de Madrid", *Bulletin de la Société Géologique de France*, 2<sup>a</sup> serie, t. XX pp. 698-702, Sesión de 22 de junio de 1863, París.

Igualmente, para la elaboración de este trabajo, se han examinado las revistas: *Anales de Minas*, *Boletín Oficial de Minas*, *Revista Minera*, *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico* y *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural*.

Original recibido: Febrero 1997.  
Original aceptado: Abril 1997.

encierra. Los ingenieros de minas ofertan a los arqueólogos equipos de prospección minera, laboratorios de análisis de materiales, conocimientos geológicos, apoyo informático y otros, pero desde luego este papel hoy es muy distinto al desempeñado en el siglo XIX. Fig. 8.



MUSEO DE PALEONTOLOGÍA

- 1 Curiosidades arqueológicas del ramo de minería.
- 2 Cesto romano de extracción y desagüe. (Minas de Cartagena.)
- 3 Anfora romana. (Minas de Cartagena.)
- 4 Femur restaurado de *Elephas meridionalis* Nest. 1,60 m. largo. (Torralba-Soria).

Fig.8 - Materiales arqueológicos de la Escuela de Minas, a principios de siglo

REFERENCIAS

AYARZAGÜENA SANZ, Mariano (enero de 1990), "Orígenes de la Arqueología prehistórica en España", Revista de Arqueología 105, pp. 16-24, Madrid.

- (1992), La Arqueología prehistórica y protohistórica española en el siglo XIX, Tesis doctoral en microfichas, UNED, Madrid.

CARTAILHAC, Emile (1886), Les âges préhistoriques de l'Espagne et du Portugal, Résultats d'une mission scientifique, Prefacio de Quatrefages, París.

CAZURRO, M. (1924), La riqueza en metales preciosos en la España Antigua, Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona XVIII, Barcelona.

GOBERNA, M<sup>a</sup> Victoria (1986), "Los estudios de prehistoria durante la segunda mitad del siglo XIX y primeros años del XX.- La obra de Luis Siret", Actas del Congreso-Homenaje a Luis

Siret (1934-1984), Cuevas de Almanzora, Junio de 1984, pp. 29-34, Sevilla.

JOLY, N. L'homme avant les métaux Lib. Germer Bailliére et Cie. París.

PELAYO, Francisco (1995), "Un capítulo en la creación de la Cátedra de Geología y Paleontología de la Universidad Central: La formación científica de Juan Vilanova y Piera en Europa", Llull, vol. 18, n<sup>o</sup> 35, pp. 493-516, Zaragoza.

PRADO Y VALLO, Casiano de (1864), Descripción física y geológica de la Provincia de Madrid, Junta General de Estadística, Madrid.

PUCHE RIART, Octavio (1994), "La contribución de los ingenieros de minas y naturalistas a la Arqueología española: Los inicios de los estudios prehistóricos en España", Boletín Geológico y Minero 104 (3), pp. 94-128, Madrid.

PUCHE RIART, O.; SERRANO VALVERDE, R.; BERNARDEZ GOMEZ, M<sup>a</sup> J.; GUI-SADO DI MONTI, J.C. & CALVO PEREZ, B. (1994), "Análisis sobre el origen de

los materiales arqueológicos del Museo Histórico Minero D. Felipe de Borbón y Grecia, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid", Boletín Geológico y Minero 105 (5), pp. 79-90, Madrid.

TUBINO, Francisco María (1868), Estudios prehistóricos, Oficina de la Revista de Bellas Artes, Madrid.

VILANOVA Y PIERA, Juan (1872), Origen, Naturaleza y Antigüedad del Hombre, Madrid.

VERNEUIL, ED. DE & LARTET, L. (1862-3), "Note sur un sílex taillée trouvé dans le diluvium des environs de Madrid", Bulletin de la Société Géologique de France, 2<sup>a</sup> serie, t. XX pp. 698-702, Sesión de 22 de junio de 1863, París.

Igualmente, para la elaboración de este trabajo, se han examinado las revistas: Anales de Minas, Boletín Oficial de Minas, Revista Minera, Boletín de la Comisión del Mapa Geológico y Anales de la Sociedad Española de Historia Natural.

Original recibido: Febrero 1997.  
Original aceptado: Abril 1997.

## MINERIA PARA EL DESARROLLO.

Por R. CASTROVIEJO (\*)

### INTRODUCCION

Este trabajo continúa la reflexión presentada por el autor en esta revista (número Noviembre-Diciembre 1995, págs. 76-78), aportando nuevos datos y propuestas, a fin de completarla y darle cuerpo en proyectos concretos.

El sector minero se enfrenta en un futuro próximo, según recientes previsiones económicas (E&MJ, 1995 b), a un notable crecimiento, comparable al *boom* de los años 50/70, motivado en gran parte por las demandas de nuevos países en proceso acelerado de industrialización. Esto contrasta con su creciente marginación en el entorno europeo, aunque dicho sector es de importancia decisiva todavía para muchos países (especialmente PVD o Países en Vías de Desarrollo) y reviste para su Desarrollo un significado particular, que previsiblemente va a acentuarse en los años venideros.

Llama la atención la escasa presencia de la minería en los planes de cooperación al desarrollo más significativos UE - AL (Unión Europea - América Latina), sobre todo si se tiene en cuenta que Iberoamérica es el blanco más atractivo para la actual inversión minera y que en la UE sobra *know-how* y tecnología minera, mientras escasean los recursos que abundan en AL, lo que dibuja un panorama económico complementario para ambas regiones, que es el más favorable objetivamente para la cooperación.

No es que falten voces para reclamar la presencia ingenieril y empresarial en el ámbito de la cooperación internacional:

(\*) Prof. E.T.S. Ing. Minas (U.P. Madrid), c/. Ríos Rosas, 21, 28003 Madrid.

desde el Instituto de la Ingeniería de España y en el marco del III Congreso Nacional (Madrid) se ha insistido en su oportunidad (Medina del Cerro, 1991). Pero en el sector minero español -y en gran parte UE-, tal vez por sus características el mejor situado para tal fin en la actual coyuntura, no se puede decir que dicha cooperación sea una realidad significativa.

La reflexión sobre esta paradoja y sobre posibles respuestas positivas es el objeto de este trabajo, que comienza con una breve perspectiva histórica, para tratar de comprender el presente y pensar en el futuro. Se intenta contribuir a valorar las consecuencias de esta problemática situación para los PVD y para Europa y a practicar algunas vías constructivas para avanzar hacia un desarrollo sostenible. Ello sin la menor pretensión de sentar cátedra ante problema tan colosal, complejo y dramático como es el de la cooperación para el desarrollo.

### ANTECEDENTES

Una simple constatación, de índole histórica, arroja más luz sobre la paradoja citada: el control de los recursos minerales ha estado en la raíz de las estrategias tradicionales de las grandes potencias y de no pocos conflictos, incluso bélicos, y ha sido típicamente una de las reivindicaciones esenciales de los movimientos de liberación en PVD. Sin embargo, actualmente la actividad minera ha sido prácticamente borrada de la mayor parte de las reivindicaciones y programas de desarrollo.

Las privatizaciones y la renuncia a las reservas estatales de los PVD están en el orden del día y las **TNC** (*Trans-National Corporations*) van adquiriendo un prota-

gonismo casi absoluto<sup>1</sup>. Los centros de investigación, universidades, instituciones públicas mineras o metalúrgicas, servicios geológicos, etc. tienden a ver reducida su capacidad. Esto también, y muy particularmente, en el mundo desarrollado (vbgr. BRGM o *Bureau de Recherches Géologiques et Minières* de Francia; USGS o *US Geological Survey*), cuando no son desmanteladas, como el USBM o *US Bureau of Mines* (Doeblich, 1995).

Es notable el contraste con las inquietudes oficiales de los años 70 por el riesgo de agotamiento de recursos no renovables, de las que los sucesivos informes del Club de Roma son un buen exponente (Meadows *et al.*, 1972) y que dieron lugar a una fiebre investigadora coronada por el éxito y... por el descenso de los precios de los metales y por sucesivas crisis mineras. Más tarde, el riesgo de agotamiento se extenderá a la misma biosfera (ibid., 1992). En recientes trabajos (Castroviejo, 1994 b y

<sup>1</sup> Por citar un ejemplo, en Brasil se han introducido, a partir de 1995, enmiendas a la Constitución -ésta sólo data de 1988-, para favorecer las actividades mineras de las TNC, cuyas inversiones habían caído de 40 a cerca de 2 millones de \$ entre 1988 y 1990 (E&MJ, abril 1995, p. 16). Además, se pretende reducir el déficit presupuestario, de 11.000 millones de \$ (US \$ 11B), mediante la venta (privatización) de derechos o minas estatales, entre ellas la emblemática Cia. Vale do Rio Doce (CVRD), la mayor productora / exportadora de mineral de hierro del mundo, cuyos beneficios en 1994 ascendieron a 654 millones \$ (ibid., aug. 1995, p. 22). En otros países como el Perú, el proceso, aunque reciente, está ya muy avanzado.

1995) se señala este fenómeno, para mostrar la necesidad de la implicación de las instituciones de la cooperación para un desarrollo minero sostenible. Ahora se pone el acento en el papel de la industria.

#### SITUACION ACTUAL

El análisis de inversiones para los próximos cinco años parece confirmar la vitalidad de la industria minera a nivel mundial: según G. Bowers y A. Thomas (1995), desde enero de 1993, los aumentos de precios de los minerales se han traducido en un aumento en la inversión minera de hasta unos 20.000 millones de dólares. Pero el reparto de este crecimiento es irregular.

\* La Unión Europea ha perdido en los últimos años la mayor parte de su minería clásica, pero mantiene una notable actividad en el sector no metálico; por lo demás, la UE parece carecer de estrategia en el sector. Sin embargo, conserva todavía casi intacta su capacidad científica e investigadora y su *know-how* tecnológico minero, debido a que el proceso de colapso es reciente, aún existen las personas y todavía no se ha desmantelado totalmente la infraestructura industrial.

\* Los Estados Unidos, incomparablemente más ricos que la UE en recursos minerales, verán también posiblemente reducida su actividad extractiva metálica<sup>2</sup> por dos razones: 1) presión medio-ambiental; 2) estrategia gubernamental con el doble objetivo de: 2.1) garantizar abastecimiento externo a su industria sin necesidad de agotar las propias reservas y 2.2) estimular la demanda externa de equipamiento industrial y *know-how* minero de procedencia USA, en espera de un beneficioso efecto de retorno sobre la economía USA.

\* Por esta razón, se está produciendo un importante éxodo de inversiones en exploración minera de USA hacia AL (incremento del 49 % en un solo año, E&MJ, 1994 a) particularmente hacia Perú y Chile; a esas inversiones hay que añadir las de procedencia japonesa, europea, canadiense, etc. Como resultado, se está registrando en dicha región el mayor *boom* minero del mundo (Rath, 1995): los gastos en exploración -que se han multiplicado por un factor 5 en los

últimos cuatro años- superan ya los 500 millones de dólares anuales (US \$500M/yr) y las previsiones apuntan ya a la próxima inversión de 10.000 millones de dólares (10 billones USA: \$10B) en nuevos proyectos<sup>3</sup>. Como referencia, puede ser de interés el señalar que en otras regiones del mundo y particularmente en países mineros por excelencia, como el Canadá, las inversiones se han estancado o reducido.

Los datos más recientes (Bowers y Thomas, 1995) por regiones, para un total de US \$ 18.454 millones de inversión mundial en minería metálica planificados para los próximos cinco años en los países de economía de mercado, confirman el primer puesto de Iberoamérica con más de un tercio del total (35'2 %), seguida de América del Norte (20'6 %), y de África (17'7 %), Asia (12'5%), Australasia (12'2 %) y Europa (no llega al 2 %).

Este panorama expansivo del sector minero al Sur de Río Grande puede ilustrarse con el ejemplo del Perú, país para el que la minería (metálica) es un sector fundamental que ha aportado prácticamente la mitad (promedio 49 %) de sus ingresos totales por exportación durante la pasada década (Morgan, 1993).

Por otra parte dicha industria resulta clave en el desarrollo del país, no sólo para la obtención de divisas (y reducción de la deuda externa), sino también

<sup>2</sup> Ya en 1994, la producción del sector metálico representaba sólo una tercera parte del total de la minería de materias primas no energéticas, frente a los 2/3 aportados por MRI (Minerales y Rocas Industriales).

<sup>3</sup> Ha de señalarse que las sustancias cobre (55%) y oro (25%) reciben el grueso de las inversiones -tendencia que podría acentuarse al contabilizar los proyectos menores- y que en el futuro (proyección 1994/95) éstas se concentrarán en el oro mayoritariamente. Otras estimaciones (Bowers y Thomas, 1995) mantienen la cifra conjunta del 80 % del total mundial para las dos sustancias citadas, pero aunque dan una participación al oro más elevada que la anterior (una tercera parte del total) acentúan la preferencia por el cobre (la mitad del total), "desde lo que era una división prácticamente a partes iguales entre ambos metales".

como motor del desarrollo industrial y como creadora de empleo indirecta, ya que el efecto multiplicador de la industria minera sobre la economía del país -actividades y servicios creados para responder a las demandas generadas por la minería- se estima por un factor 5x.

Según fuentes internacionales (Phelps, 1994) el país es presa de una fiebre minera que implica a numerosas TNC (*Trans-National Corporations*), especialmente de USA, ávidas de explotar una riqueza<sup>4</sup> que se estima inmensa -se calcula que sólo se conoce un 7 % del potencial explotable, posiblemente el mayor por descubrir en el continente (en estimación de *Eng. & Min. J.* 1994 b y 1995 a). En mayo de 1994 se había registrado, en sólo 18 meses, un incremento del 30 % en el número de concesiones mineras<sup>5</sup>. Más recientemente (Fernández *et al.*, 1995), se ha estimado en 19 millones de Has. el área cubierta por concesiones mineras. No es ajena a este *boom* la política de privatización de las reservas del Estado, equivalentes a 6 veces la superficie cultivable del país.

Según previsiones de la ONU, hacia el año 2000 en el Perú se podrán haber

<sup>4</sup> Sirva de ejemplo la mina de Yanacocha, la mayor de oro de Iberoamérica, recientemente descubierta por un consorcio internacional (Newmont Perú, Buenaventura, BRGM), que ha empezado su actividad extractiva en 1993 y llega ya a una producción de oro -450 oz/yr, unas 13,5 t/año- que duplica la española de los últimos años, siendo ésta -unas 6/7 Tm anuales- aproximadamente el 60 % de la producción minera de oro de la UE en el mismo período. Las previsiones de producción para 1997 (unas 16 t) posiblemente se queden cortas (se habla de 20 t). Otro dato tal vez más significativo todavía (Haris, 1995) es que Newmont recuperó ya en el primer año de producción de la mina todo el capital invertido. Con respecto al total del país, la entrada en producción de Maqui Maqui (segunda fase de desarrollo de Yanacocha) ha elevado al Perú al segundo lugar entre los productores auríferos ibero-americanos, superando a Chile y superado únicamente por Brasil, tras alcanzar las 50 t/año en 1995 (Informe, 1996).

<sup>5</sup> En los primeros meses de 1995 han aumentado en otros 13 millones de *acres* (más de 5 millones de Has.) más.

invertido entre 5.000 y 7.000 millones de \$ USA (es decir, \$5-7B); en 1994, sólo el programa de privatización en curso le había reportado ya al Gobierno 2.000 millones de US \$ (o \$2B, E&MJ, 1994 b); en febrero de 1995, se registraban inversiones USA por valor de 634 millones \$, la mayor parte en minería (E&M J, 1995 a), sector para el que "entre diciembre de 1993 y abril de 1995, el incremento en la inversión extranjera alcanzó US \$ 368'2 millones, existiendo además importantes compromisos de inversión a largo plazo" (Fernández *et al.*, 1995). El origen de estos capitales es significativo: el 82'3 % proceden de USA o Islas Caimán, el 13'7 % de Canadá y el 4% de Europa (UK), según los datos de J.V. Fernández *et al.*(1995).

Teniendo en cuenta las previsiones de crecimiento de la actividad inversora para el oro y el enorme potencial de la geología peruana para este metal -algunos lo estiman superior al de Chile, dada la potencialidad de los terrenos Paleozoicos peruanos para filones auríferos, que se suma a la de las mineralizaciones epitermales Meso/Cenozoicas similares a las chilenas-, es de esperar en los próximos años un fuerte desarrollo de la minería del oro peruana, fundamentalmente en manos de TNC. Esta tendencia está ya prácticamente consolidada: la producción peruana de oro en 1994 (37'8 t.) duplica la de 1979; la de 1995 (56 t., Eguiguren, 1996) supera las previsiones (38 t) y representa un incremento del 84 % en menos de tres años. Para el año 2000 (2.110.000 oz. Au o 63 t previstas: Fernández *et al.*, 1995), se plantea ya el objetivo de alcanzar las 100 t (E&MJ, 1995 c), con lo que el Perú pasaría a ser el primer productor de oro iberoamericano.

Frente a esto, nada garantiza que otros sectores mineros, como el de los MRI (Minerales y Rocas Industriales), básicos para el país pero de menor demanda en el mercado internacional, vayan a recibir la atención adecuada. Como referencia, la producción USA de MRI ascendió en 1994 a 23.000 millones de \$ (\$23B), es decir unos dos tercios del total de la producción minera de materias primas (*nonfuel*) del país (Cleva, 1995). Difícilmente se puede invocar un mayor contraste.

#### REFLEXIONES PARA UN FUTURO DESARROLLO

Desde el punto de vista del Desarrollo en PVD, es indispensable un esfuerzo

objetivo de análisis, que no se reduzca al movimiento de capitales. Hay, entre otras, tres cuestiones relevantes:

1) el desarrollo está en peligro si se limita a la exportación de materias primas metálicas de alto valor (vbgr. oro y plata) y no se crea una industria de transformación y producción manufacturera autóctona que corresponda al nivel de sus recursos minerales; en particular, sería recomendable el equilibrar la minería metálica con el desarrollo de la minería de MRI o minerales y rocas industriales -muy escasamente desarrollada en todo el sub-continente: Castroviejo, 1994 a-, capaz de crear y abastecer industrias locales (García del Amo, 1994): la abundancia coyuntural de recursos de la primera (privatizaciones, impuestos, percepción de cánones, etc.) podría contribuir a la financiación de la segunda, para garantizar la continuidad de un desarrollo industrial propio;

2) en relación con la cuestión precedente, hay que preguntarse sobre el control y gestión de dicho proceso; no parece posible ni siquiera imaginar dicho desarrollo si un país no se dota de capacidad, no sólo administrativa, sino tecnológica e investigadora suficiente: el imprescindible papel de las instituciones, universidades y empresas autóctonas es inviable si no se superan actuales deficiencias, lo que constituye un objetivo insoslayable para la cooperación científico-técnica;

3) la experiencia europea y norteamericana demuestra que el desarrollo minero incontrolado es un suicidio, particularmente por sus efectos medio-ambientales; el controlar vertidos y actividades mineras es necesario para lograr un desarrollo sostenible y obliga a velar no sólo desde el punto de vista legislativo y administrativo, sino también por la capacitación técnica local en el campo ecológico y de la restauración ambiental. Esto constituye otra meta importante de la Cooperación Técnica para el Desarrollo, sobre todo teniendo en cuenta los niveles graves de deterioro ambiental hoy existentes y que no se cuenta entre los objetivos de las TNC precisamente el velar por la armonía de la naturaleza. Sin pretender acusar a nadie, pero sin tampoco pretender que los estados PVD dimitan de su

deber de velar por la salud de la población, ha de reconocerse el peligro de que se tolerase el desplazamiento de TNC a Sudamérica precisamente para hacer allí los daños ecológicos que no se les toleran en su lugar de origen.

#### CONCLUSIONES Y OBJETIVOS DE COOPERACION

En conclusión, parece evidente que una estrategia de desarrollo para el continente Iberoamericano en la actual coyuntura no debería bajo ningún concepto prescindir del sector minero, llamado por su dinamismo y potencialidad -se desee o no, y a diferencia de lo que sucede en la UE- a ser un factor clave en el panorama económico de la región<sup>6</sup>.

Como estrategia de cooperación, parece razonable el colaborar para tratar de encauzar dicho dinamismo en el sentido de un desarrollo positivo para los países

<sup>6</sup> Resulta inevitable el interrogarse sobre los planteamientos de cooperación para el desarrollo que dan prioridad únicamente a áreas como las de alimentación y salud: ¿no se está con ello transmitiendo -involuntariamente sin duda- a los países en cuestión la idea de que su única meta es sobrevivir, es decir, una imagen asistencial? ¿Es que los PVD no deben aspirar al propio desarrollo industrial? ¿No es lógico también priorizar el desarrollo industrial de sus propios recursos según las necesidades sentidas por ellos mismos y por medio de instituciones e investigadores propios? Lo contrario puede significar -visto desde los PVD- que se marginan sus aspiraciones al desarrollo industrial y, de rechazo, puede significar también que dicho desarrollo se produzca de una forma más anárquica y agresiva, mientras que el colaborar en el mismo puede contribuir a encauzarlo de una forma ecológicamente positiva (sostenible), acorde con los intereses globales de un mundo que ha de ser habitable para todos. Este objetivo, documentado y analizado por el Premio Nobel A. Salam (1990), caracteriza precisamente una cooperación digna y equitativa, que evita por igual el paternalismo y el desarrollismo y que busca integrar los mundos educativo/universitario e industrial, tal como la practicada desde el centro universitario que él dirige en Trieste (Italia).

de la región. Podría darse un desarrollo realista (**sostenible**) si los países iberoamericanos, con la cooperación internacional pertinente, son capaces de:

- contribuir con sus **propios medios** técnicos (las diversas especialidades de la exploración geológico-minera, laboreo de minas, mineralurgia y metalurgia, etc.) y aprovechando la actual coyuntura favorable, a la puesta en valor de sus importantísimos recursos mineros, que pueden ser la base de un fuerte desarrollo industrial.
- velar por un desarrollo **equilibrado** y que responda a las necesidades del país<sup>7</sup>, evitando la fácil caída en el "monocultivo" minero exportador, sea cual sea la sustancia (oro, cobre, petróleo, etc., frecuentemente en manos de TNC) y cuidando de encauzar el actual impulso inversor a fin de que sirva también para la dinamización de otros sectores necesarios para el desarrollo de una industria local: sirva de ejemplo, sin salir del sector minero, lo ya dicho para el binomio oro / MRI en el caso del Perú (Castroviejo, 1994 a).
- evitar la trampa del "desarrollismo", relacionando desde el primer momento la actividad minera con un **entorno ambiental** a respetar/restaurar y cuidando la cualificación del personal técnico en ese sentido, aparte medidas legales y de control; no debe olvidarse que el medio ambiente se protege mejor atajando los problemas en su raíz -trabajando por un desarrollo responsable- que limitándose a lamentar/corregir los desastres debidos a un desarrollo/subdesarrollo incontrolado.

<sup>7</sup> No será ocioso recordar el estudio de Shamololo (1988), que muestra cómo cierto tipo de desarrollo minero impuesto en Kasai (Zaire) empobrecía a la población autóctona, mientras que cuando dicha actividad minera desaparecía el nivel de vida, el comercio, la actividad económica, etc. de la región se recuperaban. Tampoco estaría de más recordar, al respecto, el dramático problema de las actuales explotaciones petrolíferas en Nigeria. O en Guinea Ecuatorial (Bochongolo P. y Nsue, P., 1995).

Por otra parte, desde el punto de vista de los intereses y de las instituciones españolas y UE, hay ahora una oportunidad excepcional de participar en un proceso de envergadura, que se está produciendo ya y va a continuar, con o sin presencia europea. En el primer caso, una colaboración en este terreno podría ser beneficiosa para ambas partes, por la complementariedad de las situaciones económicas de las dos regiones en el sector minero (Castroviejo, 1994 b). En el segundo caso -ausencia europea-, será presidido por intereses TNC (de USA, Japón, Canadá, etc.), con efectos imprevisibles para el desarrollo y para el medio ambiente regionales y sin duda lamentables para Europa, no sólo: (i) por renunciar a su presencia en un área clave para el abastecimiento de recursos minerales importantes, sino también (ii) porque su industria minera -actualmente en una situación de dudosa supervivencia, al menos la metálica y energética- perdería una ocasión de reactivarse, teniendo -como desde luego tiene- tecnología, *know-how* y experiencia de investigación que ofrecer.

Pero por encima de todo ello, está la oportunidad -tal vez irreplicable, en una coyuntura particularmente dinámica y de apertura al exterior- de coadyuvar a un desarrollo sostenible, con criterios que representan un salto cualitativo en la concepción de la cooperación, mediante la investigación y desarrollo tecnológico compartidos en un sector crítico y mediante la consolidación de relaciones de interés común, objetivamente complementarias.

Estos criterios, tal vez utópicos para algunos, son sin embargo realizables, como lo prueba el hecho de que hayan sido recogidos por la UE: vbgr. en el Programa **ALFA** (América Latina Formación Académica), que co-financia la cooperación universitaria e industrial y en el que curiosamente no parece tener la menor intención de participar -y quisiera equivocarme- ninguna industria minera española, siendo ésta en principio la que tendría una posición de salida más ventajosa, por evidentes razones culturales y políticas. En el marco del Programa citado, se están coordinando desde la ETSI Minas (Universidad Politécnica de Madrid), además de un pre-proyecto de gestión universitaria, dos proyectos de cooperación universitaria (fase preparatoria de

la movilidad de investigadores, Red ALEMMA) para la formación de alto nivel en investigación minera, que se espera conduzcan a un cauce continuo de relaciones UE-AL, centrado en la investigación de recursos geológicos, particularmente metales preciosos y minerales y rocas industriales, con vistas al desarrollo de una minería sostenible.

Dicho programa fomenta la cooperación de la industria en los programas de formación para la investigación de alto nivel financiados por la UE. Esta colaboración puede hacerse bajo diversas formas de co-financiación privada (becas, facilidades para la investigación de problemas de interés industrial, programas comunes de investigación, participación personal...), que pueden producir un efecto de retorno beneficioso para la empresa implicada (adquisición de información, conocimientos o técnicas, aplicación a problemas industriales, selección de personal cualificado... hasta la investigación de propias concesiones mineras). Las TNC están ya participando: sin hacer apología de las multinacionales, es evidente que pueden -y deberían- jugar un papel importante en la consecución de un desarrollo sostenible, cuya necesidad se hace sentir cruelmente.

En cualquier caso, para la realidad española / UE (y particularmente para el sector metálico), la disyuntiva tal vez sea a la vez más simple y más cruda, a saber: ¿cooperación o extinción? Aún rehuendo expresiones extremadas, no parece haber muchas más alternativas: la minería del futuro, si ha de haberla, deberá ser una Minería para el Desarrollo. Desarrollar una actividad minera con estos objetivos es una acción necesaria y posible, pero implica una actitud de colaboración (pública y privada) leal y, al mismo tiempo, auto-crítica.

#### REFERENCIAS

- BOCHONGOLO P., NSUE P. (1995): ¿Bendición o Maldición? La producción de petróleo en Guinea Ecuatorial. ASO-DEGUE / Voces GE, nº 7 (extra, octubre 1995), Madrid, 8 p.
- BOWERS G., THOMAS A. (1995): Inversión Mundial en Minería. Mining, nº. 7 (octubre 1995), p. 36-37.

CASTROVIEJO R. (1994 a): Sobre el desarrollo de la Minería metálica y no metálica en América: un análisis introductorio. Mesa Redonda sobre Minerales y Rocas Industriales. VIII Congreso Peruano de Geología, 20-22 Julio 1994, Aula B.

(1994 b): Integración académica para el desarrollo del I y del III Mundo.- Un breve análisis desde la perspectiva de la industria minera. Seminario sobre Programa de Estudios Integrados-Conférence des Grandes Ecoles, Madrid, 1994.

(1995): Minería Ibero-Americana (UE-AL): ¿Una coyuntura para el desarrollo? Bol. Geol. y Minero, v. 106, nº 6, nov-dic. 1995, p. 76-78, ITGE, Madrid.

CLEVA S. (1995) Industrial Minerals contribute to GNP. Geotimes, sept. 1995, p. 7-8.

DOEBRICH J. L. (1995) International Reports: USA: Western. Internat. Liaison Gr. Gold Mineralization, 21 (oct. 1995), Univ. Southampton, p. 6-8.

EGUIGUREN W. (1996) Veinte años de minería del oro en el Perú. Conferencia Soc. Geol. del Perú (acto de presentación de la Red ALEMMA), Lima, 2 sept. 1996.

E&MJ (1994 a): Looking Elsewhere.

Annual Project Survey. Engineering and Mining Journal 195, 1, p. 18-19

(1994 b): This month in Mining, Perú, Engineering and Mining Journal, 195, 9, p. 16.

(1995 a): Vale un Perú, Engineering and Mining Journal, 196, 2, p. 11.

(1995 b): Nonferrous Metals & Mining Outlook. Engineering and Mining Journal, 196, 3, p.36.

(1995 c) Mining, Latin America: Peru. Engineering and Mining Journal, 197, 8, p.26.

FERNANDEZ J.V., RAMIREZ J.C., RUIZ R.V. (1995) Minería Peruana: la oportunidad del siglo XXI. Mining, 7 (octubre 1995), p. 10-16.

GARCIA DEL AMO D. (1994) Utilización de los Recursos de RMI (Rocas y Minerales Industriales) para el Desarrollo. Mesa Red. MRI. VIII Congr. Peruano de Geología, 20-22 Julio 1994, Aula B.

HARRIS L. (1995) Yanacocha / Atahualpa's legacy. Engineering and Mining Journal, August 1995, p. 32.

Informe (1996) Revisión por países de los principales proyectos: la carrera por el oro en América Latina. Latinominería, 17, p. 9 - 21.

MEADOWS D. H. *et al.* (1972) Los Límites del Crecimiento. Universe Books, N. York.

(1992) Más allá de los Límites del Crecimiento. El País / Aguilar, Madrid, 355 p.

MEDINA DEL CERRO L. (1991) Ingeniería Española y Cooperación Internacional. Actas III Congr. Nacional de Ingeniería, Inst. Ing. España, PG4, p. 61-82.

MORGAN GRENFELL & CO. Limited Proinversión SA: San Antonio de Poto Gold Concessions-Appendices (Perú). Report, Sept. 1993.

PHELPS R.W. (1994): Perú. After over 20-yr "nationalized slumber", the mining sector is reawakening-fast!. Engineering and Mining Journal, 195, 5, p. 54-68.

RATH U.E.G. (1995): Focus on Latin America. Two steps forward, one back-2000 a turning point?. Engineering and Mining Journal, 196, 4, p. 32-35.

SALAM A. (1990): Science, Technology and Science Education in the Development of the South. The Third World Academy of Sciences, Trieste, Italy, 323 p.

SHAMOLOLO T.E. (1988): Entreprises Minières et Développement de l'Economie Capitaliste au Zaïre. Cahiers Cedef, 3, Bruselas, 109 pp.

Original recibido: Noviembre 1996.  
Original aceptado: Abril 1997.

## NOTAS BIBLIOGRAFICAS

### GEOLOGIA ECONOMICA DE LOS RECURSOS MINERALES.

La Fundación Gómez-Pardo, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, ha editado recientemente el libro de texto *Geología Económica de los Recursos Minerales*.

El libro, escrito por el Profesor Fernando Vázquez Guzmán, Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid y antiguo Director de Recursos Minerales del Instituto Tecnológico Geominero de España, está especialmente dedicado a los alumnos de la Escuela de Ingenieros de Minas de esta Universidad, asimismo será, sin duda, de gran interés para todos aquellos estudiantes y titulados superiores que se relacionen o trabajen en el campo de la minería.

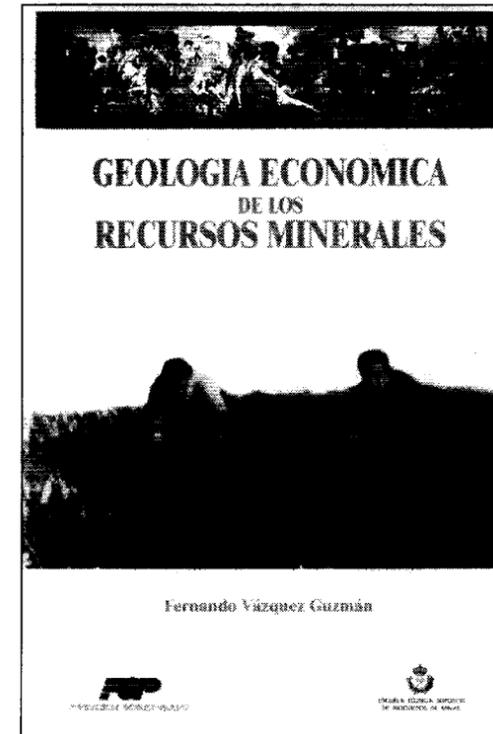
Aunque pudieran discutirse e incluso objetarse determinados aspectos del mismo, como la extensión y profundidad con que se exponen algunos temas, o bien el que no se aborden otros, la publicación de *Geología Económica de los Recursos Minerales* supone un loable esfuerzo para paliar la escasez de publicaciones en lengua castellana, sobre el origen o formación de los recursos minerales.

En una primera parte general e introductoria (capítulos 1 a 7), se presentan la relación existente entre el conocimiento sobre el origen o génesis de los yacimientos y la búsqueda de nuevas fuentes de materias primas minerales; las definiciones y conceptos básicos, como mena, esteril, ley, factor de concentración, texturas y estructuras de las menas, etc; las diferentes circunstancias y condicionamientos que determinan los conceptos de recursos y reservas, su clasificación, leyes de corte, etc; el establecimiento del precio de los metales en organismos tales como el *London Metal Exchange*, el *International Tin Council* y el *Intergovernmental Council of Copper Exporting Countries*; etc.

La clasificación de los yacimientos se establece de acuerdo a los cuatro procesos fundamentales de formación: Depósitos formados por procesos

ígneos; formados a partir de aguas calientes, salmueras, etc; formados por procesos en la superficie terrestre o a escasa profundidad; formados o modificados por metamorfismo.

La estructura y composición de la Tierra es tratada sucintamente, así como la distribución actual de los continentes, de acuerdo con la teoría de placas.



Los capítulos 6 y 7, dedicados a los procesos en los fundidos silicatados, a la diferenciación magmática, a sus productos de interés económico, al papel de los componentes volátiles en los magmas, y a los principios que gobiernan la distribución de los elementos y complejos traza en los magmas, cierran esta parte introductoria o general del libro.

El resto de los capítulos corresponden a la descripción de los procesos que originan o controlan la formación de cada tipo de depósito, en particular, con ejemplos de los principales yacimientos

mundiales, países productores, tablas de reservas mundiales, etc. El autor se limita, en general, a mencionar las hipótesis genéticas aceptadas para estos más importantes yacimientos o las controversias sobre los mismos, sin profundizar en ellas.

Dentro de los depósitos de segregación magmática se consideran los de **cro-mita**, describiéndose los yacimientos del Complejo Igneo de Bushveld, en Africa del Sur; del Gran Dique de Zimbabwe; del Complejo de Stillwater, en Montana (USA); los de **sulfuros de níquel, cobre y elementos del grupo del platino**, asociados a rocas básicas, de Sudbury, en Ontario (Canadá); y muy someramente, los de la provincia Eastern Golfields, en Australia, asociados a rocas ultrabásicas; las mineralizaciones de **chromita-niquelita** de Ronda, en Málaga (España); etc.

De los depósitos de kimberlitas, lamproitas y carbonatitas (capítulo 9) se consideran los de **diamantes** en Australia, Africa del Sur, Botswana, etc; los de **tierras raras** de Mountain Pass, en California (USA); de **cobre, fósforo y vermiculita** de Palabora, en Africa del Sur, con magnetita, uranio, cobalto, circonio, etc, como sub-productos; los de **fósforo y hierro** de Rusia y Finlandia, etc.

Las bases del proceso pegmatítico sirven de introducción al yacimiento de uranio de Rössing, en Namibia, haciéndose referencia a los antiguos depósitos pegmatíticos españoles (Santa Comba, Fontao, La Fregeneda, S<sup>a</sup> Albarrana, etc).

Se resalta el papel de la greisenización y albitización en la formación de los depósitos neumatolíticos, con los ejemplos clásicos de Cornwall-Devon (Inglaterra), de Erzgebirge (Alemania), Panasqueira (Portugal) y otros, y se exponen numerosos ejemplos entre los metasomáticos de contacto, o de **skarn**.

Como ejemplos de yacimientos originados tanto a partir de soluciones procedentes de la consolidación de un

## NOTAS BIBLIOGRAFICAS

### GEOLOGIA ECONOMICA DE LOS RECURSOS MINERALES.

La Fundación Gómez-Pardo, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, ha editado recientemente el libro de texto *Geología Económica de los Recursos Minerales*.

El libro, escrito por el Profesor Fernando Vázquez Guzmán, Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid y antiguo Director de Recursos Minerales del Instituto Tecnológico Geominero de España, está especialmente dedicado a los alumnos de la Escuela de Ingenieros de Minas de esta Universidad, asimismo será, sin duda, de gran interés para todos aquellos estudiantes y titulados superiores que se relacionen o trabajen en el campo de la minería.

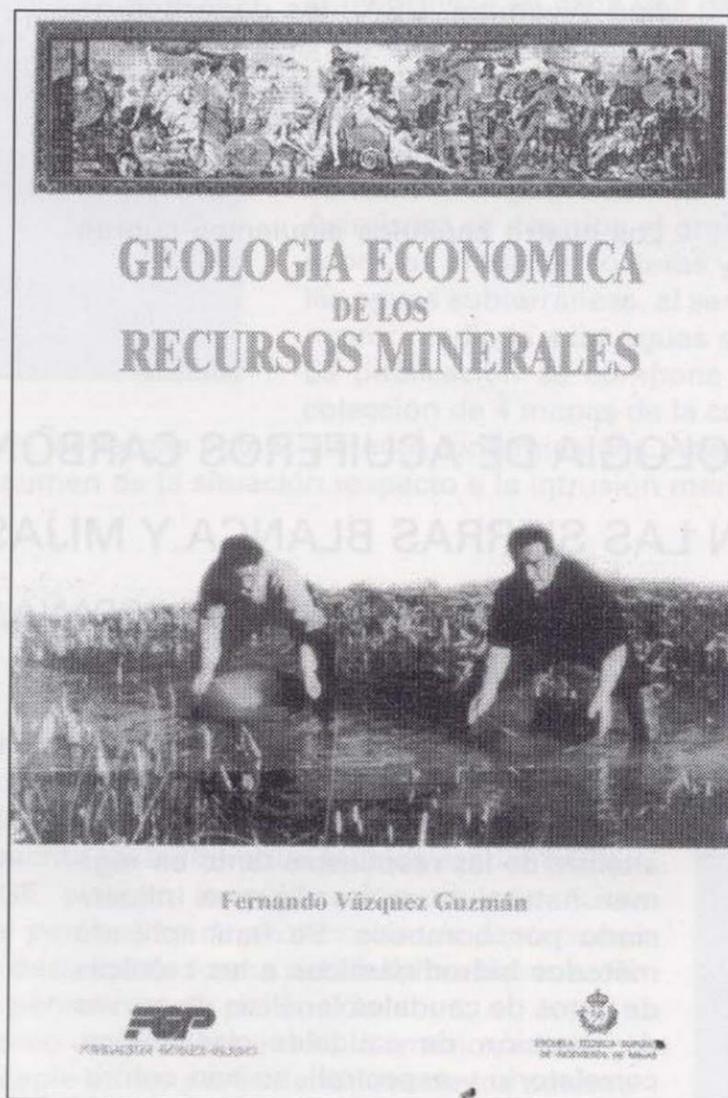
Aunque pudieran discutirse e incluso objetarse determinados aspectos del mismo, como la extensión y profundidad con que se exponen algunos temas, o bien el que no se aborden otros, la publicación de *Geología Económica de los Recursos Minerales* supone un loable esfuerzo para paliar la escasez de publicaciones en lengua castellana, sobre el origen o formación de los recursos minerales.

En una primera parte general e introductoria (capítulos 1 a 7), se presentan la relación existente entre el conocimiento sobre el origen o génesis de los yacimientos y la búsqueda de nuevas fuentes de materias primas minerales; las definiciones y conceptos básicos, como mena, esteril, ley, factor de concentración, texturas y estructuras de las menas, etc; las diferentes circunstancias y condicionamientos que determinan los conceptos de recursos y reservas, su clasificación, leyes de corte, etc; el establecimiento del precio de los metales en organismos tales como el *London Metal Exchange*, el *International Tin Council* y el *Intergovernmental Council of Copper Exporting Countries*; etc.

La clasificación de los yacimientos se establece de acuerdo a los cuatro procesos fundamentales de formación: Depósitos formados por procesos

ígneos; formados a partir de aguas calientes, salmueras, etc; formados por procesos en la superficie terrestre o a escasa profundidad; formados o modificados por metamorfismo.

La estructura y composición de la Tierra es tratada sucintamente, así como la distribución actual de los continentes, de acuerdo con la teoría de placas.



Los capítulos 6 y 7, dedicados a los procesos en los fundidos silicatados, a la diferenciación magmática, a sus productos de interés económico, al papel de los componentes volátiles en los magmas, y a los principios que gobiernan la distribución de los elementos y complejos traza en los magmas, cierran esta parte introductoria o general del libro.

El resto de los capítulos corresponden a la descripción de los procesos que originan o controlan la formación de cada tipo de depósito, en particular, con ejemplos de los principales yacimientos

mundiales, países productores, tablas de reservas mundiales, etc. El autor se limita, en general, a mencionar las hipótesis genéticas aceptadas para estos más importantes yacimientos o las controversias sobre los mismos, sin profundizar en ellas.

Dentro de los depósitos de segregación magmática se consideran los de **cro-mita**, describiéndose los yacimientos del Complejo Igneo de Bushveld, en Africa del Sur; del Gran Dique de Zimbabwe; del Complejo de Stillwater, en Montana (USA); los de **sulfuros de níquel, cobre y elementos del grupo del platino**, asociados a rocas básicas, de Sudbury, en Ontario (Canadá); y muy someramente, los de la provincia Eastern Golfields, en Australia, asociados a rocas ultrabásicas; las mineralizaciones de **cro-mita-niquelita** de Ronda, en Málaga (España); etc.

De los depósitos de kimberlitas, lamproitas y carbonatitas (capítulo 9) se consideran los de **diamantes** en Australia, Africa del Sur, Botswana, etc; los de **tierras raras** de Mountain Pass, en California (USA); de **cobre, fósforo y vermiculita** de Palabora, en Africa del Sur, con magnetita, uranio, cobalto, circonio, etc, como subproductos; los de **fósforo y hierro** de Rusia y Finlandia, etc.

Las bases del proceso pegmatítico sirven de introducción al yacimiento de uranio de Rössing, en Namibia, haciéndose referencia a los antiguos depósitos pegmatíticos españoles (Santa Comba, Fontao, La Fregeneda, S<sup>a</sup> Albarrana, etc).

Se resalta el papel de la greisenización y albitización en la formación de los depósitos pneumatolíticos, con los ejemplos clásicos de Cornwall-Devon (Inglaterra), de Erzgebirge (Alemania), Panasqueira (Portugal) y otros, y se exponen numerosos ejemplos entre los metasomáticos de contacto, o de **skarn**.

Como ejemplos de yacimientos originados tanto a partir de soluciones procedentes de la consolidación de un

magma, como los formados por soluciones constituidas bien por aguas magmáticas primarias, bien por mezcla de éstas con aguas meteóricas, se destacan los depósitos mesotermales de **Au** y epitermales tipo **hot springs**, en rocas volcánicas, filonianas y diseminados. El autor cubre en este capítulo tipos tan importantes como Mother Lode, Homestake, Carlin etc.

Las diseminaciones y **stockworks** (pórfidos) de **Cu**, de **Mo** y de **Sn-Ag** son descritos en detalle y asociados a intrusioniones plutónicas, algunas de las cuales se exponen en relación con depósitos de **skarn** (caso de Carr Fork, USA).

Los depósitos volcánicos-exhalativos sedimentarios (capítulo 14) son tratados extensamente, dada la importancia económica de los depósitos masivos de **sulfuros de metales base** de Canadá, Japón, Península Ibérica, Chipre, etc, y de **sulfuros de mercurio** (Almadén,

España). El autor incluye en este capítulo los depósitos estratiformes de **óxidos de hierro y otros elementos** (Kiruna, Suecia; Olympic Dam, Australia) y de óxidos de manganeso (Mamatwan, Wessels, etc, en Africa del Sur), sobre los que no existe unanimidad de criterio sobre sus génesis, entre los investigadores.

En el capítulo 15 se incluyen los yacimientos estratoconfinados, tales como los depósitos de **metales base** asociados a rocas carbonatadas tipo Mississippi Valley, tipo alpino, tipo irlandés, los depósitos de Otavi Mountain Land (Namibia), etc; los depósitos de **uranio** en areniscas tipo Colorado Plateau y tipo Wyoming, USA); los depósitos de **sulfuros masivos** en sedimentos de Alemania, Australia, Alaska y Canadá); y los depósitos de **cobre** en sedimentos de Europa y Zambia.

Los cuatro capítulos siguientes cubren

los yacimientos originados por la interacción de la litosfera con la atmósfera y la hidrosfera, y directamente relacionados con los procesos de meteorización, transporte precipitación y diagénesis: Placeres y paleoplaceres; depósitos residuales de **bauxitas** y **lateritas**, de **níquel** y de enriquecimiento supergénico; formaciones sedimentarias de **hierro y manganeso**, de **fosfatos** y formaciones evaporíticas, **sales**.

Los procesos de formación de **carbones** y **hidrocarburos** son tratados en el capítulo 20, incluyendo interesantes estadísticas de producciones mundiales.

Finalmente, se consideran los depósitos metamórficos y metamorizados, incidiendo en los de **wollastonita**, de **andalucita**, **cianita** y **sillimanita**, y de **mármoles** y **pizarras**.

El libro concluye con una extensa lista de referencias.

L.A.

## HIDROGEOLOGIA DE ACUIFEROS CARBONATADOS EN LAS SIERRAS BLANCA Y MIJAS. CORDILLERA BETICA, SUR DE ESPAÑA.

La obra que a continuación comentamos es la Tesis Doctoral de D. Bartolomé Andreo Navarro, recientemente editada por el Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga.

En ella se estudian varios sistemas acuíferos existentes en las Sierras Blanca y Mijas, dos macizos carbonatados que constituyen la Unidad Hidrogeológica más importante de la Costa del Sol, con una superficie aproximada de 170 km<sup>2</sup>, de la cual se abastece una población del orden de 250.000 personas.

La obra tiene dos objetivos fundamentales. El primero, de carácter práctico, delimitar los sistemas acuíferos a partir de un adecuado conocimiento de la geología y de las cotas piezométricas y evaluar los recursos y las reservas de agua disponibles. También se comentan aspectos relacionados con la calidad del agua.

El segundo objetivo, de carácter teórico-

científico y el que más se desarrolla en el libro, es intentar conocer el funcionamiento hidrogeológico de cada uno de los sistemas investigados, mediante el análisis de las respuestas tanto en régimen natural como en régimen influenciado por bombeos. Se han aplicado métodos hidrodinámicos a las crónicas de datos de caudales (análisis de curvas de recesión de caudales clasificados, correlatorio y espectral), se han controlado las variaciones del nivel piezométrico, columnas litológicas de sondeos, ensayos de bombeo. Igualmente, se ha llevado a cabo un control hidrotérmico, hidroquímico (componentes químicos mayoritarios y trazas), tanto del agua de lluvia como subterránea, y se han practicado determinaciones isotópicas, así como de radiactividad natural de las aguas subterráneas.

Los métodos aplicados, en gran parte, se han utilizado en otros lugares (Pirineos, Jura, Appalachés), aunque en éste caso se dispone de abundante información de sondeos, niveles piezo-

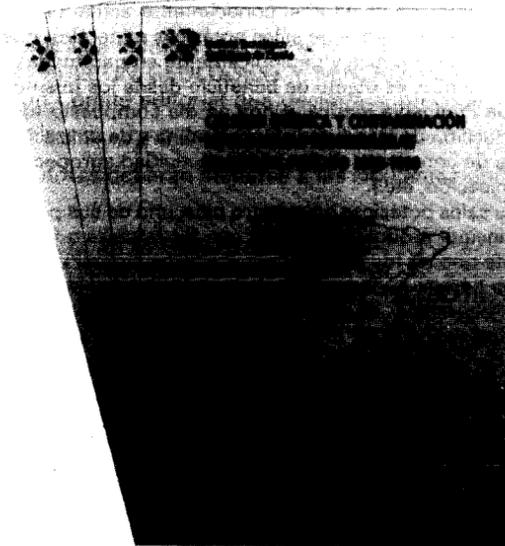
métricos y ensayos de bombeo que permiten precisar en cada sistema acuífero los resultados obtenidos a partir del análisis de las respuestas naturales. El estudio de sistemas ha permitido constatar que la respuesta de éstos depende de la estructura y funcionamiento interno, pero también de circunstancias externas como el clima y la tectónica. Por ello, en la obra se critica la aplicación de clasificaciones de los acuíferos carbonatados que toman como referencia parámetros indicativos de la estructura interna del sistema, sin tener en cuenta el contexto climático y tectónico.

Los acuíferos carbonatados alpujárrides, tradicionalmente, se han considerado como poco karstificados. Sin embargo, en las Sierras Blanca y Mijas, pueden diferenciarse dos tipos básicos de comportamiento acuífero, dependiendo del grado de fracturación, karstificación y de la litología: sistemas kársticos y sistemas fisurados.

L.A.

## ULTIMAS PUBLICACIONES DEL ITGE

### CALIDAD QUIMICA Y CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN ESPAÑA, PERIODO 1982-1993.



Esta publicación muestra el estado de la calidad de las aguas subterráneas en España, de acuerdo con la actual distribución de las cuencas hidrográficas en unidades hidrogeológicas. El documento actualiza uno anterior editado por el ITGE en 1985, titulado "Informe de Síntesis. Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España". El título que se presenta ahora, se refiere a las cuencas del *Duero*, *Guadiana*, *Segura* y *Ebro* (el resto de las cuencas está en elaboración, próximamente aparecerán las *Cuencas Internas de Cataluña*, *Las Cuencas del Norte* y *la del Júcar*), y constituyen una parte del estudio realizado a nivel nacional, en el que se expone la situación actual de la calidad química de las aguas subterráneas en cada una de las unidades hidrogeológicas de las citadas cuencas, recoge asimismo una evaluación de la carga potencialmente contaminante, procedente de las actividades urbanas (residuos sólidos y vertidos líquidos), agropecuarias e industriales establecidas dentro de las unidades que pueden repercutir de forma negativa en la calidad de las aguas subterráneas. Asimismo se describe el grado de afección de la intrusión marina sobre las unidades costeras y de la incidencia de los nitratos sobre las aguas subterráneas, al ser dos de los problemas que afectan en mayor medida a las aguas subterráneas en España.

La publicación se compone de una memoria descriptiva y una colección de 4 mapas de la cuenca en los que se esquematizan las características químicas de las aguas y las cargas potencialmente contaminantes. Además, en las cuencas que comprenden zonas litorales se añade un mapa resumen de la situación respecto a la intrusión marina.

Su precio es de 2.000 pts. + I.V.A.

### GUIA PARA LA ELABORACION DE PERIMETROS DE PROTECCION DE LAS AGUAS MINERALES Y TERMALES

La mejor manera de garantizar la calidad de las aguas subterráneas es, sin lugar a dudas, prevenir la contaminación de los acuíferos y evitar de esta manera que las sustancias extrañas puedan acceder al agua. Entre las medidas de carácter preventivo destaca el establecimiento de perímetros de protección, cuya metodología de elaboración apenas estaba descrita en la literatura técnica escrita en castellano, hasta que en 1991 el ITGE elaboró la publicación titulada "Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas" en la que se describe de forma detallada las bases teóricas y prácticas para el diseño de los perímetros de protección.

En la publicación actual, que surge como un complemento a la anterior, a lo largo de más de cien páginas, se hace hincapie en las particularidades de los parámetros destinados a la protección de captaciones de aguas minerales y termales, describiéndose en primer lugar el marco legal y administrativo con la legislación vigente. Posteriormente se describen los estudios previos necesarios para poder aplicar la metodología explicada en los capítulos siguientes. La protección cualitativa es tratada extensamente, tanto en lo relativo a los criterios de delimitación de los perímetros como en las metodologías específicas para medios porosos y cársticos o fisurados.

Se dedica una especial atención a algunas técnicas especiales como es el empleo de trazadores o la datación del agua mediante isótopos de gran interés cuando se aborda el estudio de sistemas de flujo complejos.

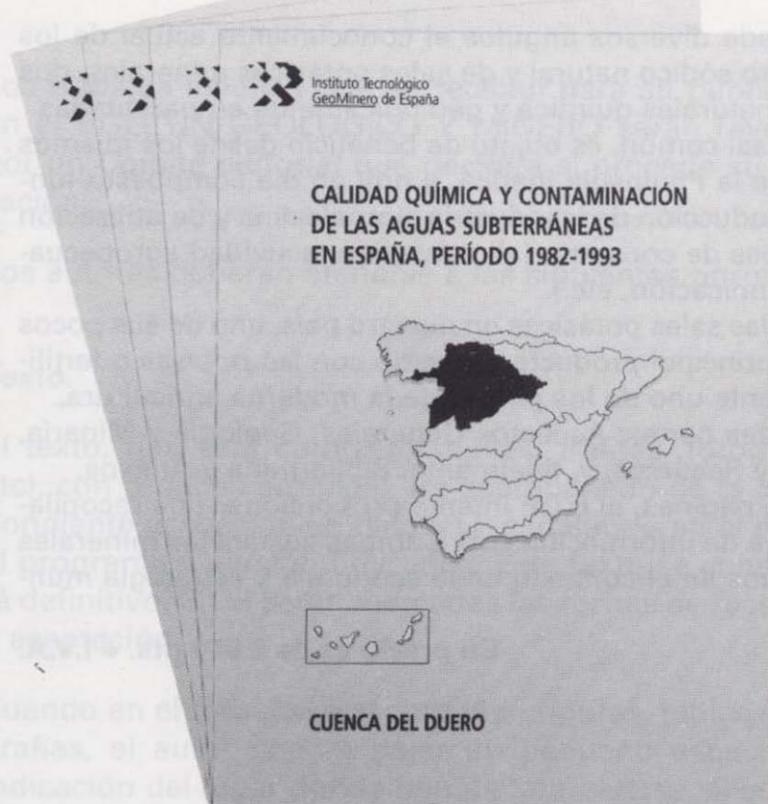
Finalmente se presenta el control técnico y administrativo a que están sujetos los perímetros de protección, y se concluye la obra con un modelo de informe y la bibliografía.

Su precio es de 3.000 pts. + I.V.A.



## ULTIMAS PUBLICACIONES DEL ITGE

### CALIDAD QUÍMICA Y CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ESPAÑA, PERIODO 1982-1993.



Esta publicación muestra el estado de la calidad de las aguas subterráneas en España, de acuerdo con la actual distribución de las cuencas hidrográficas en unidades hidrogeológicas. El documento actualiza uno anterior editado por el ITGE en 1985, titulado "Informe de Síntesis. Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España". El título que se presenta ahora, se refiere a las cuencas del *Duero*, *Guadiana*, *Segura* y *Ebro* (el resto de las cuencas está en elaboración, próximamente aparecerán las *Cuencas Internas de Cataluña*, *Las Cuencas del Norte* y *la del Júcar*), y constituyen una parte del estudio realizado a nivel nacional, en el que se expone la situación actual de la calidad química de las aguas subterráneas en cada una de las unidades hidrogeológicas de las citadas cuencas, recoge asimismo una evaluación de la carga potencialmente contaminante, procedente de las actividades urbanas (residuos sólidos y vertidos líquidos), agropecuarias e industriales establecidas dentro de las unidades que pueden repercutir de forma negativa en la calidad de las aguas subterráneas. Asimismo se describe el grado de afección de la intrusión marina sobre las unidades costeras y de la incidencia de los nitratos sobre las aguas subterráneas, al ser dos de los problemas que afectan en mayor medida a las aguas subterráneas en España.

La publicación se compone de una memoria descriptiva y una colección de 4 mapas de la cuenca en los que se esquematizan las

características químicas de las aguas y las cargas potencialmente contaminantes. Además, en las cuencas que comprenden zonas litorales se añade un mapa resumen de la situación respecto a la intrusión marina.

**Su precio es de 2.000 pts. + I.V.A.**

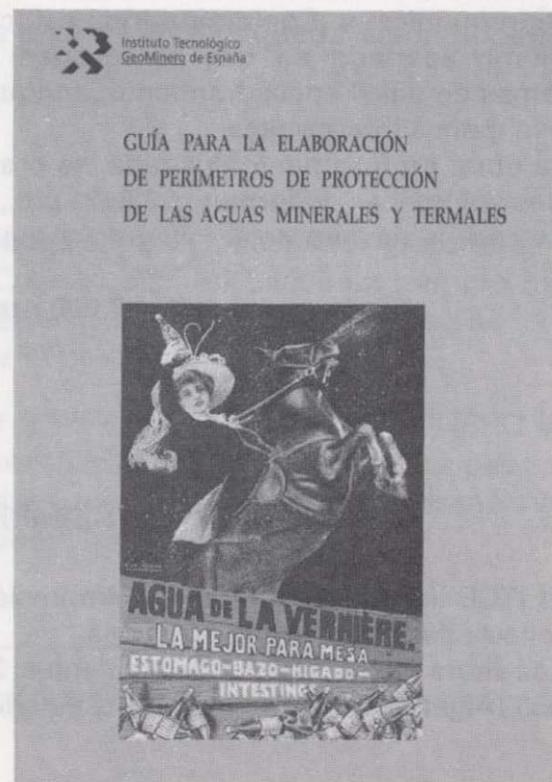
### GUÍA PARA LA ELABORACION DE PERIMETROS DE PROTECCION DE LAS AGUAS MINERALES Y TERMALES

La mejor manera de garantizar la calidad de las aguas subterráneas es, sin lugar a dudas, prevenir la contaminación de los acuíferos y evitar de esta manera que las sustancias extrañas puedan acceder al agua. Entre las medidas de carácter preventivo destaca el establecimiento de perímetros de protección, cuya metodología de elaboración apenas estaba descrita en la literatura técnica escrita en castellano, hasta que en 1991 el ITGE elaboró la publicación titulada "Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas" en la que se describe de forma detallada las bases teóricas y prácticas para el diseño de los perímetros de protección.

En la publicación actual, que surge como un complemento a la anterior, a lo largo de más de cien páginas, se hace hincapie en las particularidades de los parámetros destinados a la protección de captaciones de aguas minerales y termales, describiéndose en primer lugar el marco legal y administrativo con la legislación vigente. Posteriormente se describen los estudios previos necesarios para poder aplicar la metodología explicada en los capítulos siguientes. La protección cualitativa es tratada extensamente, tanto en lo relativo a los criterios de delimitación de los perímetros como en las metodologías específicas para medios porosos y cársticos o fisurados.

Se dedica una especial atención a algunas técnicas especiales como es el empleo de trazadores o la datación del agua mediante isótopos de gran interés cuando se aborda el estudio de sistemas de flujo complejos.

Finalmente se presenta el control técnico y administrativo a que están sujetos los perímetros de protección, y se concluye la obra con un modelo de informe y la bibliografía.



**Su precio es de 3.000 pts. + I.V.A.**

## ULTIMAS PUBLICACIONES DEL ITGE



### INVENTARIO NACIONAL DE RECURSOS MINERALES DE CLORURO SÓDICO Y SALES POTÁSICAS

Esta publicación aborda desde diversos ángulos el conocimiento actual de los recursos españoles de cloruro sódico natural y de sales potásicas minerales, dos grupos de materias primas naturales química y geológicamente emparentadas. El cloruro sódico natural, la sal común, es objeto de beneficio desde los mismos orígenes del poblamiento de la Península Ibérica, y hoy en día compuesto fundamental en la cadena de producción de la industria cloroalcalina y de utilización en otras manufacturas o áreas de consumo (alimentación, actividad agropecuaria, deshielo de vías de comunicación, etc.).

Igualmente están presentes las sales potásicas en nuestro país, uno de sus pocos productores mundiales; su principal producto derivado son las *potasas* o fertilizantes potásicos, en el presente uno de los pilares de la moderna agricultura.

Se estructura en las siguientes partes: Aspectos Generales, Geología y Minería, Yacimientos, Explotaciones y Recursos, y, finalmente, Bibliografía y Anexos.

Con esta publicación de 445 páginas, el ITGE intenta proporcionar una recopilación lo más completa posible de información sobre ambas sustancias minerales y mostrar los recursos propios en el contexto de la economía y estrategia mundiales.

**Su precio es de 2.500 pts. + I.V.A.**

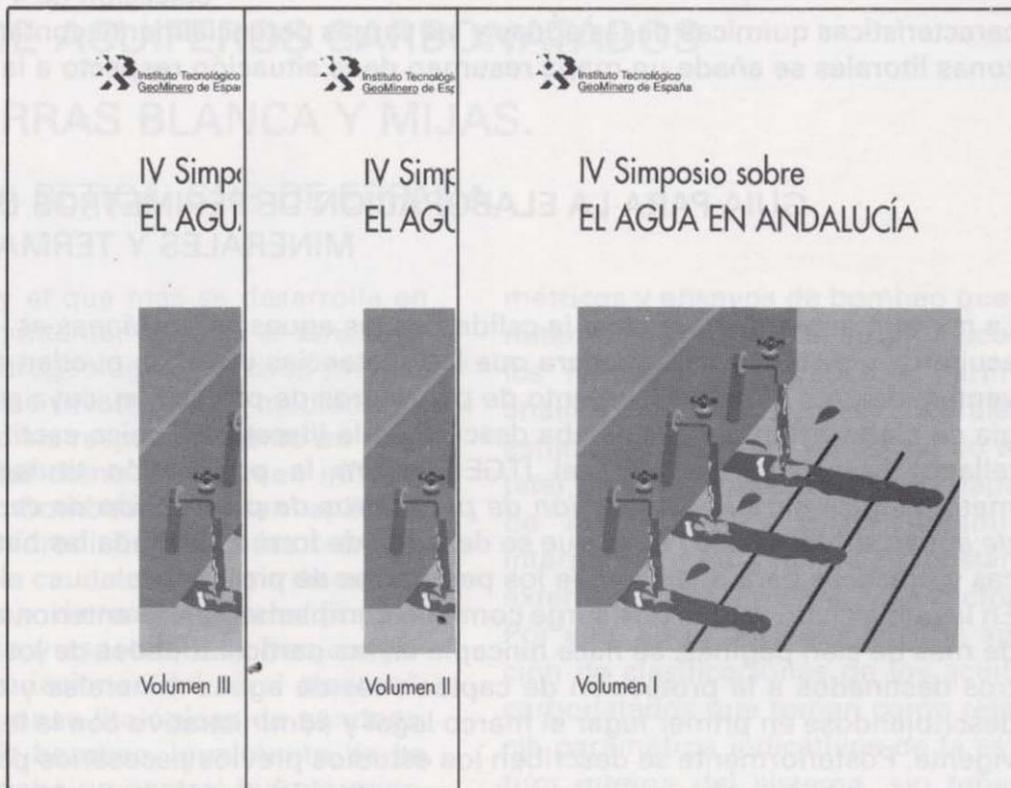
### IV SIMPOSIO SOBRE EL AGUA EN ANDALUCÍA

Recoge la totalidad de los trabajos y ponencias presentadas al IV Simposio sobre el Agua en Andalucía, celebrado en Almería en el pasado mes de Diciembre.

El conjunto cubre un amplio espectro que va desde la climatología e Hidrogeología de superficie, pasando por la Hidrogeología, Aprovechamiento y Gestión de Recursos Hídricos, Hidroquímica y Contaminación, así como un último apartado en que se recogen diversos temas de difícil encuadramiento, aunque no por ello menos interesantes.

La obra, profusamente ilustrada, se presenta en tres volúmenes de formato 29,5x21 cm., con una extensión que supera el millar de páginas

**Su precio es de 7.000 pts. + I.V.A.**



### REIMPRESION DE 12 HOJAS Y MEMORIAS MAGMA

El ITGE ha hecho una nueva reimpresión de Hojas y Memorias Geológicas a Escala 1:50.000 (serie MAGNA), cuyas existencias habían quedado agotadas.

Las ahora realizadas son las siguientes: 31 (Ribadesella), 50 (Cangas de Narcea), 105 (Riaño), 363 (Manresa), 508 (Cercedilla), 535 (Algete), 545 (Morella), 606 (Chinchón), 640 (Segorbe), 664 (Enguñanos), 696 (Burjasot) y 720 (Requena).

**Su precio es de 2.500 pts. + I.V.A.**

## ULTIMAS PUBLICACIONES DEL ITGE



## INVENTARIO NACIONAL DE RECURSOS MINERALES DE CLORURO SODICO Y SALES POTASICAS

Esta publicación aborda desde diversos ángulos el conocimiento actual de los recursos españoles de cloruro sódico natural y de sales potásicas minerales, dos grupos de materias primas naturales química y geológicamente emparentadas. El cloruro sódico natural, la sal común, es objeto de beneficio desde los mismos orígenes del poblamiento de la Península Ibérica, y hoy en día compuesto fundamental en la cadena de producción de la industria cloroalcalina y de utilización en otras manufacturas o áreas de consumo (alimentación, actividad agropecuaria, deshielo de vías de comunicación, etc.). Igualmente están presentes las sales potásicas en nuestro país, uno de sus pocos productores mundiales; su principal producto derivado son las *potasas* o fertilizantes potásicos, en el presente uno de los pilares de la moderna agricultura. Se estructura en las siguientes partes: Aspectos Generales, Geología y Minería, Yacimientos, Explotaciones y Recursos, y, finalmente, Bibliografía y Anexos. Con esta publicación de 445 páginas, el ITGE intenta proporcionar una recopilación lo más completa posible de información sobre ambas sustancias minerales y mostrar los recursos propios en el contexto de la economía y estrategia mundiales.

Su precio es de 2.500 pts. + I.V.A.

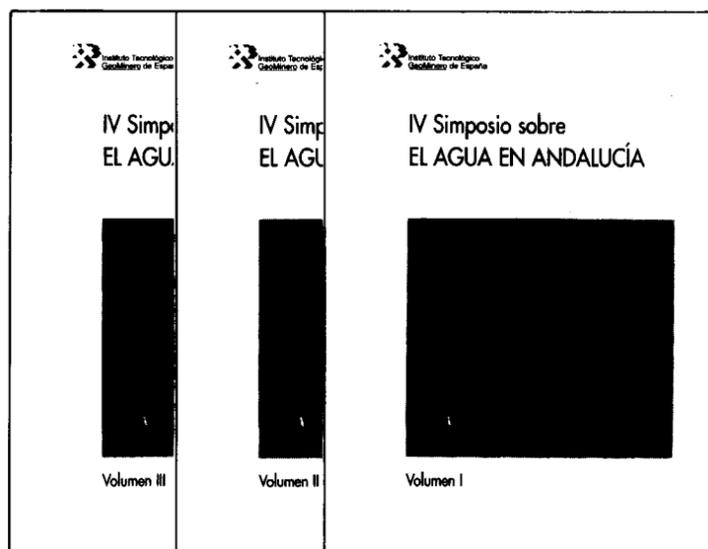
## IV SIMPOSIO SOBRE EL AGUA EN ANDALUCIA

Recoge la totalidad de los trabajos y ponencias presentadas al IV Simposio sobre el Agua en Andalucía, celebrado en Almería en el pasado mes de Diciembre.

El conjunto cubre un amplio espectro que va desde la climatología e Hidrogeología de superficie, pasando por la Hidrogeología, Aprovechamiento y Gestión de Recursos Hídricos, Hidroquímica y Contaminación, así como un último apartado en que se recogen diversos temas de difícil encuadramiento, aunque no por ello menos interesantes.

La obra, profusamente ilustrada, se presenta en tres volúmenes de formato 29,5x21 cm., con una extensión que supera el millar de páginas

Su precio es de 7.000 pts. + I.V.A.



## REIMPRESION DE 12 HOJAS Y MEMORIAS MAGMA

El ITGE ha hecho una nueva reimpresión de Hojas y Memorias Geológicas a Escala 1:50.000 (serie MAGNA), cuyas existencias habían quedado agotadas.

Las ahora realizadas son las siguientes: 31 (Ribadesella), 50 (Cangas de Narcea), 105 (Riaño), 363 (Manresa), 508 (Cercedilla), 535 (Algete), 545 (Morella), 606 (Chinchón), 640 (Segorbe), 664 (Enguídanos), 696 (Burjasot) y 720 (Requena).

Su precio es de 2.500 pts. + I.V.A.

## NORMAS DE PUBLICACION PARA LOS AUTORES

Los trabajos inéditos que se reciban para su publicación en el BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO serán revisados por un Comité editorial que decidirá si procede su publicación.

Los autores deberán atenerse a las siguientes normas:

*Texto.*

El texto, que será completo (tablas, figuras, fotografías, etc), con pruebas en papel, irá acompañado de la correspondiente grabación en disquete, señalando en el mismo el programa y versión utilizados. Este texto se considerará definitivo. En él serán marcadas las fechas de recepción y aceptación.

Cuando en el trabajo se acompañen figuras, tablas y fotografías, el autor deberá dejar un pequeño espacio con indicación del lugar donde han de intercalarse, si es posible. En los originales de las mismas se reseñará el título del trabajo, así como el nombre de los autores.

Todos los trabajos en lengua española irán precedidos de un breve resumen en español e inglés o francés. Los de idiomas extranjeros lo llevarán en su idioma y también en español. Al final de los mismos, y en párrafo aparte, se incluirán las palabras clave, reservándose el último lugar para la localización geográfica, si la hubiere.

En todo momento los autores conservarán una copia del texto original y figuras.

*Idiomas.*

Excepcionalmente podrán publicarse trabajos en otros idiomas (preferiblemente inglés o francés), siempre que abarquen temas sobre España y sean de autores extranjeros.

*Referencias.*

Se incluirá al final de cada trabajo la relación de las obras consultadas por orden alfabético de autores, empleándose las normas y abreviaturas usuales.

*Parte gráfica.*

La parte gráfica vendrá preparada para ser reproducida a las anchuras máximas de 80 mm. (una columna) y 170 mm. (doble columna). Se evitará en lo posible la inclusión de encartes, así como se reducirá a lo indispensable el número de figuras, tablas y fotografías. En las ilustraciones a escala, ésta se expresará solamente en forma gráfica, con objeto de evitar errores en caso de reducir el original. Todas las figuras irán numeradas correlativamente según su orden de inserción.

Las figuras serán originales y nunca copiativos, delineadas con tinta china sobre papel vegetal. Las tablas, bien presentadas para su reproducción fotográfica. Las fotografías serán positivos en blanco y negro sobre papel brillo y excepcionalmente en color (positivo en brillo o transparencia).

*Pruebas.*

Serán enviadas a los autores para que realicen las correcciones de erratas de imprenta producidas en la composición, no admitiéndose modificación alguna, adición o supresión al texto original.

Las pruebas serán devueltas por el autor en el plazo máximo de diez días, pasados los cuales la Redacción decidirá entre retrasar el trabajo o realizar ella misma la corrección, declinando la responsabilidad por los errores que pudieran persistir.

Los originales de texto y figuras quedarán en poder de la Redacción.

*Tiradas aparte.*

Se asignan 30 tiradas aparte con carácter gratuito por trabajo publicado. Cuando el autor desee un número mayor del indicado deberá hacerlo constar por escrito en las pruebas y abonar el precio de este excedente.

La Redacción del BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO introducirá cuantas modificaciones sean necesarias para mantener los criterios de uniformidad y calidad del mismo. De estas modificaciones se informará al autor.

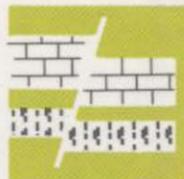
Toda la correspondencia referente a las publicaciones deberá dirigirse a:

Leopoldo Aparicio Ladrón de Guevara  
Jefe del Servicio de Publicaciones  
Instituto Tecnológico Geominero de España  
Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid

# INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA

## Finalidad:

*Investigación, Desarrollo Tecnológico y Asistencia técnica en Geología, Minería  
Agua subterráneas, y Disciplinas conexas*



## GEOLOGIA

MAPA GEOLOGICO NACIONAL (MAGNA)  
ESTUDIOS GEOLOGICOS Y CARTOGRAFIA TEMATICA  
GEOLOGIA MARINA



## RECURSOS MINERALES

EXPLORACION MINERA E INVESTIGACION DE YACIMIENTOS  
METALOGENIA Y CARTOGRAFIA METALOGENETICA  
EVALUACION DE RESERVAS E INVENTARIO DE RECURSOS  
PROCESOS, TECNOLOGIA Y ECONOMIA MINERAS  
NORMATIVA Y SEGURIDAD MINERA



## AGUAS SUBTERRANEAS

CARTOGRAFIA HIDROGEOLOGICA  
PROTECCION DE RECURSOS HIDROGEOLOGICOS  
EVALUACION Y CONTROL DE ACUIFEROS SUBTERRANEOS  
RECURSOS GEOTERMICOS



## INGENIERIA GEOAMBIENTAL

RIESGOS GEOLOGICOS  
RESTAURACION DEL MEDIO AMBIENTE MINERO  
GEOTECNIA Y GEOLOGIA APLICADA A LA INGENIERIA  
ESTUDIOS MEDIOAMBIENTALES



## LABORATORIOS Y ENSAYOS

ANALISIS QUIMICOS Y MINERALOGICOS  
GEOQUIMICA BASICA Y APLICADA  
GEOFISICA Y TELEDETECCION APLICADA  
ENSAYOS MINERALURGICOS Y GEOTECNICOS  
CARACTERIZACION DE ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES  
SONDEOS MECANICOS Y ENSAYOS DE BOMBEO



## INFORMACION, DOCUMENTACION Y BANCO DE DATOS

FONDOS DOCUMENTALES Y BASES DE DATOS  
LITOTECA  
SISTEMAS DE INFORMACION Y COMUNICACIONES



## SERVICIO DE PUBLICACIONES

CARTOGRAFIA TEMATICA A DIVERSAS ESCALAS  
PUBLICACIONES SOBRE GEOLOGIA, MINERIA Y CIENCIAS CONEXAS  
«BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO»  
«REVISTA ESPAÑOLA DE MICROPALAEONTOLOGIA»



## MUSEO GEOMINERO

PALEONTOLOGIA Y MINERALOGIA  
CATALOGACION Y GESTION DE COLECCIONES GEOLOGICAS  
EXPOSICIONES: TEMPORALES Y PERMANENTES  
DIVULGACION CIENTIFICA

### Sede Central:

C/Ríos Rosas, 23 - 28003 MADRID  
☎: 91/349 57 00. Fax: 91/349 57 62

### Centro de Laboratorios:

C/La Calera, 1 - 28760 TRES CANTOS (MADRID)  
☎: 803 22 00