

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FISICAS Y NATURALES

La génesis de los minerales, un desafío
pendiente

DISCURSO

LEIDO EN EL ACTO DE SU RECEPCION

POR EL

EXCMO. SR. D. FELIPE CALVO Y CALVO

Y

CONTESTACION

DEL

EXCMO. SR. D. FLORENCIO BUSTINZA LACHIONDO

EL DIA 28 DE MARZO DE 1979



M A D R I D

DOMICILIO DE LA ACADEMIA:

VALVERDE, 22.—TELEFONO 221-25-29

1 9 7 9

REVISTA DE LA
ACADEMIA DE LA LENGUA

ANUARIO DE LINGÜÍSTICA

REVISTA DE LINGÜÍSTICA

ISBN: 84.600-1339-8

Depósito Legal M. 11.262-1979

TALLERES GRÁFICOS VDA. DE C. BERMEJO - J. GARCÍA MORATO, 122 - MADRID

DISCURSO

DEL

EXCMO. SR. D. FELIPE CALVO Y CALVO

TEMA:

LA GENESIS DE LOS MINERALES, UN DESAFIO
PENDIENTE

(UNA INTERPRETACION DEL YACIMIENTO DE ALMADEN)

Excmo. Sr. Presidente,
Excmos. Sres. Académicos,
Señoras y señores :

La emoción, la responsabilidad y el agradecimiento han competido en mí desde que un día 2 de marzo, hace ya dos años, me hiscisteis el honor de nombrarme Académico Numerario. Mi profundo agradecimiento me urgía a solicitar la celebración de este acto porque quería, cuanto antes, manifestaros públicamente que aceptaba, con el honor, el compromiso de justificar en el futuro el crédito que mi pasado os había merecido. Pero la emoción por haber sido elegido y la responsabilidad así adquirida, lastraban mi entendimiento pidiéndome cada vez más estudio, más tinta, más papel, más tiempo, para poder llegar a componer el discurso que el acontecimiento y su significado me exigían. Espero que dentro de unos momentos comprendáis por qué tanto honor, tanta emoción y tanta gratitud a un tiempo.

Mi problema en este día, señoras y señores, va a ser dominar mi estado de ánimo. Ya iréis viendo los motivos.

Corría el año 1940 cuando llegábamos al aula del jardín de la calle de Amanuel —fría de años vacía— cargados de vivencias de una reciente guerra. Los Reyes de aquellas Navidades nos pusieron el mejor regalo para la aún más reciente paz : un maestro. Llegó —puntual, pulcro, cordial— un aragonés en el hablar y en el tratar. Era heredero de Alonso Barba ; devoto de Dalton, Proust y Lavoisier ; cliente de Le Chatelier, y discípulo de Ostwald. Durante tres años consecutivos aquel maestro, hechicero de átomos y de electrones, apóstol del equilibrio y mago del enlace químico —¡tempranos y esperanzadores conceptos de enlace y equilibrio para después de aquella guerra!— logró que sus alumnos, distintos como los elementos por peso, por familia, por afinidad y por edad, formasen un compuesto covalente, poliatómico y complejo, en el que compartimos de todo:

apuntes, reactivos, hambre, pan y vino. Sin traumas, con ganas y sin vicios.

En esta metafórica molécula todos teníamos —y tenemos— una valencia cordial ocupada en el maestro, en D. Emilio. Aquel maestro, con la excusa de la Química, y el entusiasmo por los químicos, nos hizo aceptar el sacrificio, resistir el apetito, vivir con la ración, avivando el rescoldo de la ilusión y llenando el ruinoso vacío —o vaciando la ruinoso carga— de nuestras vidas casi adolescentes. Renacíamos así a una esperanza en nosotros mismos, y en España, a la que amó entera y diferente desde un nada beato patriotismo. Destaco éste su otro amor, por oportuno. Nunca me hubiera perdonado D. Emilio que en su semblanza faltara hoy esta afirmación de amor a su entrañable Patria.

Pues bien, sabed que por vuestra benevolencia, señores Académicos, por el honor difícil de merecer que me habéis hecho, vais a colgar sobre mi pecho la medalla que antes llevara D. Emilio, mi maestro. Y ocuparé su sitio porque así está dispuesto, pero —vosotros lo sabéis— su sitio seguirá vacío: por bien que hubieseis elegido, a maestro muerto no siempre hay maestro puesto. Como me viene grande, aunque me apriete, su traje académico que él mismo me impuso en inolvidable y privada ceremonia. Por eso, aunque me veáis sentado, la valencia firme de mi filial afecto me tendrá siempre de pie ante su nombre y su recuerdo.

Conocidas estas circunstancias comprenderéis que quiera dejar escrito —y dicho precisamente hoy y desde aquí— este breve homenaje a esa figura social y académica que perpetúa su propia y decantada ética en quienes por ventura le escucharon y siguieron: al maestro. Tuve el privilegio de que mi vida transcurriera sin interrupción de magisterio, y esta singular circunstancia fue decisiva para poder hacer de un hombre vulgar, un Académico. De la Escuela de mis padres —Maestros Nacionales— pasé a la de D. Emilio, y ahora a la de los que espero que algún día se consideren mis discípulos.

Nuestro Presidente, al recibir a D. Emilio en nombre de la Academia con la efusión de una presencia tan «largamente deseada» como testarudamente rehusada, dejó descrita —y primorosamente escrita— la imagen en perspectiva de un compañero en el oficio. Difícilmente se puede agregar nada, ni decir lo mismo mejor dicho. Escribió la vida del maestro en ejercicio vista por otro maestro próximo en el afecto y en el servicio; por eso yo estoy tratando de daros la pers-

pectiva de un discípulo. Si acertara en ello, quedaría constancia de la vida total de D. Emilio que tanta huella ha dejado en la Universidad y en la sociedad.

Dijo Vd. aquel día, D. Manuel, que el magisterio superior ha de ser ejemplar para que los que de él se nutran vivan en plena corrección de estilo. Ejemplar en suficiencia de conocimientos, en pureza de vocación, en moralidad de ejercicio. Yo también doy fe de que así fue el de D. Emilio. En este salón hay otros muchos que aportarían este mismo testimonio de devoción hacia aquel personalísimo maestro, a veces desconcertante, pero diáfano en la intimidad: tieso de piel, dulce de sol, jugoso de agua del Jalón, apasionado de la única empresa que merece soñarse en todas las edades y desde todas las cunas: la educación.

Sus lecciones sobre el equilibrio, por ejemplo, eran un tratado de lo que hoy —en esa Universidad codiciante, grandilocuente y desprestigiada— se hubiera titulado algo así como «psico-socio-patología de la estabilidad dinámica». Nadie como él diagnosticó las condiciones, pronosticó las consecuencias de un desvío, advirtió sobre su sensibilidad, y enseñó a recuperarle cuando se hubiera perdido. Pero el equilibrio químico era para él una metáfora como un castillo. El era ecólogo social y su equilibrio era el de la convivencia de cada uno en su sitio, sin concesiones de ningún tipo. En la Escuela, el equilibrio se establece entre la autoridad reconocida del maestro y el espontáneo respeto del discípulo que multiplican la devoción y el afecto recíprocos que en mi caso, gracias a Dios, mis hijos conocieron.

Don Emilio montó su vida sobre una exigente respuesta magistral a toda su conducta. Apasionado de la educación como acción redentora —ya lo he dicho— la enseñanza de la química y de la metalurgia, fueron su excusa; por eso las escribió primero. Se estrenó en ellas mientras maduraba su verdadero libro en sueños y en meditaciones que tuvieron por testigos a los abetos del parque del Oeste, o los frutales de la bien vestida huerta de Calatayud, su pueblo, donde alguien que me escucha le dio el cariñoso susto de robarle el nombre para dársele nada menos que a una Escuela.

Cuando se sentaba a escribir, las ideas acudían fluidas a una pluma que, por apurar el tiempo demasiado, ya el trémulo pulso traicionaba. Para descifrar sus trazos necesitaba la resonancia de un discípulo que vibrara con el himno que escribía. Tuve ocasión de vivir durante

aquellos años una apuesta entre la vocación y un desenlace presentido que Dios retrasó todo lo que pudo: no hubo libro escrito, ni yo tuve ocasión de escribir el prólogo que me había pedido, pero D. Emilio siguió leyendo, acumulando ideas y papeles ahora mudos, ejerciendo un infatigable apostolado verbal durante su fértil jubilación en ejemplar retiro, como ejemplar fue su servicio activo y su forma de acabar, con el corazón entero. ¿Cómo puede un corazón seguir latiendo con tanta fe, tanto entusiasmo, tanta fuerza, después de haber llevado a todos tanto aliento? Pues porque en su cuerpo lo que no era corazón era cerebro. Buscando para su muerte algún consuelo, me alegré de que muriera en punto, justo cuando la falta general de educación le daba la razón en cuanto a la necesidad de un libro; en mi opinión, precisamente el suyo.

Nació maestro, creció terco, y terminó ofreciéndonos en la espera serena del tránsito la verdadera última lección de su programa de vida: el bien morir. Nos la dio como todas durante sus cincuenta años académicos: con conocimiento, con naturalidad, con fe, con entereza, con oportunidad, con humildad. Y nos pidió —¡al fin!— algo para él: perdón, y una oración.

La oración aún sigue saliendo interminable del coro de discípulos, aunque en la cuenta de Dios a los bienaventurados les sobran Padrenuestros. Pero ¿y el perdón? ¡Explicadme cómo se puede perdonar la deuda para con un maestro!

¿Comprendéis ahora por qué tanto honor, tanta emoción y tanta gratitud a un tiempo?

Si siempre un recipiendario debe presentarse ante esta Corporación con humildad y con respeto, yo lo hago hoy, además, temeroso; temeroso por la osadía que supone haber elegido para este discurso un tema que sólo últimamente hemos estudiado en nuestros trabajos personales. En verdad es una osadía que, como me gustaría demostrar a lo largo de la disertación, se podría calificar de razonable y parcial; es a los geólogos a los que ruego, desde ahora, la máxima indulgencia. Considérese este discurso como la contribución de un hombre —uno más— cautivado por la fascinante hermosura de las rocas y las piedras.

El mundo mineral próximo o profundo —siempre inerte; incapaz de perpetuarse; testigo mudo, a veces convulsivo, estremecedor, potente de fuerza— inquieta y apasiona tanto como ese otro gran reino, el de la materia viva, en que se conforman los seres que empezaron por los más sencillos aminoácidos y terminaron en el hombre inteligente; en el ser al que, hace dos mil años, se le reveló la Razón última, dejando a su tesón y a su entendimiento las razones que, experimentadas y calculadas, constituyen su creación más fecunda: la Ciencia.

Primero fue la materia y la energía unificadas, condensadas en cósmicas densidades, casi infinitas como la sabiduría del Creador, frente al vacío inimaginable de la nada. Y ese vacío, esa nada, se se pobló de mundos —materia y energía— que fueron domándose, organizándose a costa de entropía. El nuestro, esta Tierra, es uno; el más significativo entre los innumerables de ese vacío que estamos obligados a llenar de esperanza; el que nos compete entender, vivir y amar.

También fueron aquí —en casa— primero la materia y la energía; un mundo sin vida genéticamente codificada que ha dejado hermosos testimonios en rocas, en abismos, en montañas, en cavernas, en formas perfectas y colores irrepetibles; un mundo sin vida, pero con alma. Estos testigos mudos no cuentan nada de lo que fue su peri

pecía, pero lo dicen todo —a veces demasiado— al hombre que acepte el desafío que para la inteligencia supone ese silencio cargado de ruidos, de luces, de tinieblas, de formas...

¿Cómo entender un mundo que fue mucho antes de que se creara la más sencilla unidad capaz de metabolizar y duplicarse? Pues equilibrando la imaginación y la Ciencia. No es fácil alcanzar y conservar ese equilibrio; es más, creo que, por ahora, no es posible, porque son muy tentadores el escenario y la acción imaginadas, y están muy protegidos por la distancia tanto en el espacio como en el tiempo; la Ciencia aún no alcanza. Por eso os decía que mi osadía era razonable y sólo parcial al proponerme desarrollar un tema que, desde el punto de vista científico, es claramente interdisciplinar (geológico-químico-físico-filosófico), y que deja hacer a la imaginación ejercicios sobre papel en blanco. Se trata de componer una sinfonía para el poema de la Tierra del que sólo conocemos letras sueltas. Hay una métrica obligada, pero a la música le faltan notas, y clave y pentagrama. Es un problema de imaginación con múltiples soluciones, todas bellas.

Así de imaginativo y de fantástico le ha visto todavía al menos este Químico mineral, inorgánico, que ha sido, como he dicho, cautivado por el apasionante problema de entender cómo se formaron esos monumentos al orden y a la armonía que son los minerales, tan hermosos de contemplar como difíciles de interpretar.

Lo que hizo realmente singular a la circunstancia de aquellos átomos concretos que se dispusieron de tal manera —entre infinitas posibles— que dieron lugar a la situación que llamamos *vida*, fue precisamente esto: que inauguraron un nuevo reino de seres independientes, metabolizantes, reproductivos y genéticamente codificados que, a lo largo de 4.000 millones de años recorrieron la enorme distancia evolutiva que va de los microorganismos unicelulares a las criaturas multicelulares. Pero no es menos singular la circunstancia de otros átomos y sus conjuntos que, obedientes a las mismas leyes, se disponen en el orden perfecto de un cristal que puede perdurar más allá de la vida sobre la Tierra, cuando esa estrella enana que es nuestro sol se convierta en sólo un gigante rojo, un mañana de dentro de 5.000 millones de años. O esa otra alternativa a la vida animal, imaginada en organismos eléctricos de cuerpos semiconductores a la temperatura ambiente, surgida a nivel de partículas nucleares fundamentales constituyendo universos cerrados.

Pero para llegar a la Tierra según la vemos en el año del Señor de 1979, vale la pena recrearse en la fantasía que inspiró la evidente grandeza de su realidad, cuando al hombre no le faltaron ni imaginación, ni capacidad de asombro.

Según los prehistoriadores, el hombre se pasó trabajando y utilizando piedras 800.000 años. Los productos cerámicos solapan en el tiempo con la última fase de la piedra, la de la piedra «acariciada», dura pero de formas suaves, con la que los historiadores montan el período Neolítico.

La cerámica abre el camino a la metalurgia que, hace aproximadamente 6.000 años, llega accidentalmente, por fusión reductora de minerales, al metal elemento. La asociación intuitiva de ciertos minerales con los metales —útiles o vanos— puso en marcha la minería y, el interés por los minerales, el desarrollo de las artes y las ciencias de la Tierra, la actual Geología, precisamente especulando filosóficamente sobre la formación de los yacimientos.

Y es notable que, como en tantas otras cosas, los hombres inteligentes de aquella protohistoria, echándole imaginación sobre los hechos contemplados dijese ya, en el lenguaje de la ocasión y del momento, lo que hoy repetimos en jerga contemporánea.

PRIMERAS REFLEXIONES

Thales (640 a. de C.) considera ya al agua como el más importante elemento sobre la Tierra, origen de todo ser vivo o muerto; por eso se le dice a este filósofo griego padre de los Neptunistas. Xenon (340 a. de C.), por su parte, afirmaba que en la base de todo estaba el fuego; por eso ha pasado a la historia a la cabeza de los Plutonistas, apoyado después por Plinio (23-97 d. de C.) quien, al terminar una recopilación de las formas en que la inteligencia humana acude al arte para apoyarse en su afán de imitar o emular a la naturaleza, se maravilla descubriendo el hecho de que el fuego es necesario para casi toda operación: *Toma las arenas de la tierra y las funde, ora en vidrio, ora en plata, o minio, o uno u otro plomo, o alguna sustancia útil al pintor o al médico. Por el fuego se desintegran los minerales y se produce cobre; en el fuego nace el hierro, y por el fuego es sojuzgado; por el fuego se purifica el oro; por el fuego se queman piedras para levantar los muros de las casas... El*

fuego es el elemento incommensurable e incontrolable, con respecto al cual es difícil decir qué hace más, si producir o consumir.

En los tratados cosmológicos de Aristóteles (384-347 a. de C.) subyace la armonía, la continuidad y la comunidad de todos los procesos del mundo orgánico y del inorgánico a escala natural, asociando la geología, la biología y la psicología en una expresión que es todo un antecedente del evolucionismo: *la naturaleza —dice— avanza a pasos imperceptibles de lo inanimado a lo vivo.* Nada hace superfluo o en vano la naturaleza, que siempre soluciona sus problemas de la manera más sencilla posible produciendo, para cada tipo de exceso, la compensación de una contradicción, de modo que el exceso se equilibre. Buscando la unidad por la correspondencia entre el mundo material y los sentidos asocia el agua a la vista, el aire al oído, el fuego al olfato, y la tierra al tacto y al gusto.

Fuera de postular los elementos y de atribuirles sus propiedades fundamentales —la *fuerza eficiente de su causa material*— el *Corpus Aristotelicum* sólo contiene unas líneas relacionadas con la mineralogía en las que adelanta la teoría de las dos exhalaciones subterráneas: el *humo seco*, que produce tierras (minerales) y piedras; y el *vapor húmedo*, que produce metales.

Teofrasto (319 a. de C.), quien constituyó formalmente la escuela peripatética, elaboró estas ideas y dedujo que *de las cosas formadas algunas se originan del agua, otras de la tierra... Todas se forman por solidificación de la materia pura e igual en sus partes constituyentes, que se ha juntado en ese estado por mera afluencia o por medio de alguna forma de percolación, o separadas... La solidificación es, en alguna de estas sustancias, debida al calor y en otras al frío.* Como los metales licúan al calentarles, eran en sus calidades elementales *fríos y húmedos*. Las piedras, por otra parte, solidifican con calor y no licúan; son, por tanto, *secas y calientes*. La indefinida *tierra* era algo más puro y pristino que la arcilla común.

La horda de alquimistas, astrólogos y nigromantes de la Edad Media, apoyándose en la idea peripatética, pusieron, por su cuenta, menos metafísica que cuento. Por las referencias que nos llegan, para ellos las menas metálicas recibieron una influencia especial de su correspondiente planeta particular en atención a sus cosmogénicas coincidencias y calidades de *calor, frío, humedad y sequedad*. Los instruidos dejaron sentado que *aquello sobre lo que se trabaja o la materia común de todos los metales es azufre y mercurio que, a*

través del movimiento e influencia de los cielos debe haberse unido y endurecido en un cuerpo metálico o en una mena. ¡Ya decía yo que no debía andar lejos la bendición celestial para ese rincón de España en el que aún queda *materia común* —azufre y mercurio— en notable cantidad, después de que el Emperador Carlos, al menos, lo empleara en no tan bendecibles menesteres! Donde los cielos hubieron de hacer valer su influencia fue para poner en movimiento las xhalaciones minerales, vapores de azufre y de mercurio, expelidos desde las profundidades de la Tierra, que, elevándose por las venas, se unieron bajo el efecto de los planetas para formar la *mena*. Es curioso que mil y quinientos años después, nosotros mismos, dando otra interpretación a la influencia de los cielos, también pensemos que el azufre y el mercurio de Almadén, llegaron, por la gracia de Dios, unidos desde las profundidades de la Tierra.

Jabir iln Hayyan, personaje dudosamente histórico, recogió en el siglo IX, en el *Jabirian Corpus*, una colección de escritos árabes que eran como la base teórica de las prácticas alquímicas. Según Jabir, todos los metales estaban hechos de mercurio, azufre y arsénico, y para cambiar un metal base en oro era necesario alterar las proporciones de mercurio, azufre y arsénico en el metal de partida. Si los autores recogidos en el *Jabirian Corpus* hubieran realmente manipulado mercurio y azufre de la forma que sus teorías sugerían, deberían haber descubierto la síntesis del cinabrio calentando juntos sus elementos, lo cual es importante porque hubiera sido la primera síntesis deliberada de un compuesto natural.

Pero el *Jabirian Corpus* no describe realmente esto. Fue el persa al-Razi (864-923) unos años después, conocido en Europa como Razes, quien describió claramente el proceso. En la versión latina de sus escritos —*Razis de aluminibus et salibus* (siglo XIII)— puede leerse lo siguiente al hablar de la coagulación del mercurio: ... *hay otro método y es la coagulación con el olor —vapor— de azufre. Esto es, se le pone —al mercurio— en un pedazo de tejido grueso, se ata éste, y se suspende en un recipiente. Colóquese azufre en el fondo del recipiente y séllese la junta —recipiente y tapadera—. Póngase fuego bajo él durante todo el día, y retírese después del fuego para que enfríe. Se encontrará una sal roja uzifur —del árabe zanjufur = cinabrio— ... te regocijará, porque contiene innumerables maravillas.*

Fuera de la horda, los pensadores van dejando huella, convocándose a sí mismos a la interpretación del Universo en el que se sienten porque en él está el aire, la Tierra en éste, y ellos sobre la Tierra. Alberto de Colonia (1193-1280), el Magno, San Alberto, fue uno de ellos. Estudia a Aristóteles e inicia la reconciliación de sus enseñanzas con las de la Iglesia. Mendicante y pobre, dominico de primera hornada, se impone caminos largos y penosos que le llevan ese tiempo que igual existiría aunque no le observase ninguna mente. Pero Alberto observa y piensa mucho, escribe y experimenta menos, pero todo lo bastante para dejar una obra perdurable. En su *Mineralia* expone no sólo los conocimientos mineralógicos de su época, sino su propia doctrina. Para él la ciencia de los minerales debía basarse en la discusión de las *causas* que ya distinguía Aristóteles: la *material*, la *eficiente*, la *formal* y la *final*.

La *causa material* se refiere a la materia de la que los elementos están hechos, y en ella basa su clasificación general de los minerales en piedras, metales o intermedios. Su «química» es la peripatética trasladada a su época.

La *causa eficiente* representa el proceso por el que se formaron los minerales. Las dos exhalaciones aristotélicas —azufre, *humo seco*, y mercurio, *vapor húmedo*— confinadas en el seno de la Tierra, se convierten en minerales por la acción directa del calor y el frío, que son el medio de que se sirve la *causa eficiente* que representa el verdadero poder mineralizante. Alberto acude a las ideas biológicas de Aristóteles para explicar la fecundación de la *causa material* por la *causa eficiente* y atribuye a la influencia astral el cómo.

La *causa formal* hace que las cosas sean como son. Lo *formal* de los minerales —distinto de la forma— se debe al *poder formativo* que descende de los cielos, a través de las estrellas, por voluntad divina; y esto es lo que decide qué mineral en particular se ha de formar en un momento y lugar determinados. Por eso los siete metales se pusieron bajo la influencia de los siete planetas.

Es difícil atribuir una *causa final* al mundo mineral. Conforme con la idea aristotélica, San Alberto pensaba que no se podía atribuir a los minerales un fin o un propósito en sí mismo.

Se puede decir que éstas eran, pues, causas *esenciales* para piedras y metales. Hay otras *accidentales* (textura, color, dureza, densidad, maleabilidad, lustre, comportamiento frente a otras sustancias) que, por ello, no caben en nuestro propósito.

El esfuerzo del pensamiento estaba claramente orientado: Aristóteles había ya comentado que los datos obtenidos de la naturaleza por observación directa, aunque concretos, son confusos respecto a su circunstancia, difíciles de comprender; por eso la inteligencia se comprometía en su análisis tratando de llegar a principios generales y hacer comprensibles las cosas explicando sus *causas*.

San Alberto escribe su obra en la encrucijada de los hechos, del conocimiento, y de la especulación, cuando aún faltan siglos para la experimentación sistemática; pero pone ya de manifiesto las dificultades para el desarrollo de la química y de la mineralogía. Los elementos aristotélicos y sus cualidades —genial síntesis integradora y unificadora de materia y energía— no eran bastante para la clasificación química de los minerales. La idea de la transmutación fue una esperanza para la incertidumbre; algo así debía de ocurrir en la naturaleza para la formación de las menas.

La mineralogía se puso con él a la altura de la química. En su *De lapidibus* (1260) expone una versión modificada de la teoría del *Jabirian* según la cual el mercurio es el *principio madre* y el azufre el *principio padre*, y ambos, juntos, hacen todos los metales. Evidentemente, la reacción azufre-mercurio era familiar para Alberto Magno y se puede pensar que se aplicara para la fabricación del pigmento bermellón desde muy temprano, aunque la referencia histórica de su industrialización la sitúe en el siglo XVI en Venecia.

Por otra parte, a través de la *forma* trató de explicar las propiedades mágicas y curativas de las piedras, recopiladas en su *De lapidibus*, como la información factual verdaderamente buscada. Esta *forma* discutida por San Alberto no tiene, naturalmente, nada que ver con la idea actual de forma para el mineralogista. Para él era un atributo esencial, íntimo, de la identidad mineral; algo así como la vida en los seres vivos. La *forma* en los seres inanimados es lo que les identifica como son y les permite hacer lo que hacen (la *forma* de un hacha es lo que le permite cortar, el magnetismo es una *forma* de poder que identifica a la magnetita). Para Alberto de Colonia los poderes médicos o mágicos, atribuidos a algunas piedras, eran inherentes a su *forma*, y recibidos de la *causa formal* por el

poder formativo de los cielos. Por este razonamiento se llegaba a que la materia de todas las piedras era debida a una cierta *forma* de tierra o una cierta *forma* de agua. Lo mismo que el poder de la vida se derrama desde las estrellas sobre los animales producidos por putrefacción, así también el poder de formación de minerales se derrama sobre los materiales de las piedras. Cuando las fuerzas de la Tierra atacan a la naturaleza del agua, influyendo intensamente sobre ella hasta secarla, allí, por cierto, se producen los minerales.

Para terminar esta breve referencia a las ideas de Alberto Magno, he aquí, textualmente, cómo describía hace casi setecientos años unos hechos sobre los que, esencialmente, hoy no se dice mucho más: ... *Y hay aguas que fluyen a través de materiales de muy fuerte poder mineralizante, y, al fluir, se saturan de esos minerales, y así, cualquier cosa que en ellas se sumerja se convierte en piedra con más o menos rapidez, según sea mayor o menor el poder activo en hacer y formar piedras... Que el agua absorbe y se satura con tal poder, se comprueba por otras propiedades accidentales del agua, tal como el gusto a azufre u oropimente, o su amargura; porque el agua no adquiere esos gustos más que de los sitios por donde circula.*

BIRINGUCCIO

Conviene seguir dejando puntos de referencia en esta retrospectiva mineralogénica. La imprenta iba a cumplir cien años cuando salía de prensas la *Pirotechnia* de Biringuccio (1480-1538); en una referencia más nuestra diríamos que habían transcurrido sólo treinta años desde que el Cardenal Cisneros fundara la Universidad de Alcalá. De las treinta mil obras impresas en el siglo xv, ninguna lo fue sobre temas metalúrgicos y muy pocas sobre tema científico de ninguna clase. La mayoría eran obras de hombres muertos ya hacía siglos.

Biringuccio fue, esencialmente, un minero práctico, que informaba para algo muy concreto relativo al beneficio de los minerales, estimulando a la acción a otros hombres inteligentes. Escribiendo trescientos años después que Alberto Magno, y desde una actitud tan distinta, lejos de la especulación, no puede sorprender que se refiera a la obra del dominico con respetuosa ironía.

Para Biringuccio lo necesario era encontrar el método verdadero

haciendo una y otra vez, variando siempre el procedimiento y deteniéndose en el mejor. Como puede apreciarse se está introduciendo la experimentación. Los minerales no le preocupan más que como objeto de explotación: ... los hombres penetran las montañas con los ojos de la estimación y buen juicio, y ven, casi exactamente, los lugares donde hay menas y su cantidad. Dirigen la excavación hacia ellos porque si no tendrían que hacerlo al azar, porque no hay otra forma por la que el hombre pueda comprender dónde hay menas en la montaña, por bueno que sea su juicio o por detalladamente que puedan haber buscado. Además, es necesario andar mucho adquiriendo certeza, asegurándose por la apariencia de las cosas (tratando de encontrar cuantas más posibles) y abriendo siempre ojos y oídos a aquello que suponga una esperanza de encontrar una información, especialmente de pastores y otros antiguos habitantes del país... Digo esto —continúa— porque no creo que el hombre, por fuerte y cuidadoso que sea, tenga suficiente resistencia para caminar examinando con minuciosidad una sola montaña que pudiera contener mena. Algunos, porque conocen esta dificultad, dicen usar de nigromancia. Considero esto una cosa fabulosa, pero no tengo información de lo que pueda ser, y no intento ni alabarlo ni condenarlo, y si lo que ellos dicen que hacen fuera verdad, sería algo muy útil. Sin embargo, me gustaría que me dijeran esos nigromantes por qué no usan su arte después de haber encontrado la mena y hacen a la mitad y al final lo mismo que hacen al principio, es decir, utilizar su arte para excavar la mena y reducirla a material fundido, y a la pureza de su separación. Se puede creer que si tienen poder para hacer una de las dichas cosas, también tiene el poder para hacer las otras, pero tales operaciones son tan temerosas y horribles que ni deberían ni podrían practicarse, ni todos los hombres desean hacerlas. La razón principal por la que debe creerse que tales prácticas están abandonadas en esa parte del trabajo, es que siempre que ha empezado la excavación de una mina, es costumbre, primero, implorar la gracia de Dios para que nos ayude en todo esfuerzo dudoso o difícil, y en lugar de esto se estaría implorando la ayuda de los demonios del infierno. Por tanto, para descubrir menas, creo que es mejor abandonar el camino de los hombres bestiales e intrépidos y seguir el de utilizar los signos que nos son presentados por la benignidad de la naturaleza, fundados en la verdad y aprobados por todos los expertos por su experiencia; lo cual, como es evidente, no consiste en

palabras o promesas de cosas vanas e incomprensibles... Hecho esto, cuando tengas una buena provisión de alimentos, un buen número de mineros experimentados en el trabajo que quieras hacer, y todas las herramientas necesarias para romper y excavar las rocas y sacar los minerales, y cuando tengas las montañas y la mina bautizada por un sacerdote en el nombre de Dios (dedicándola, como es costumbre, a la Santísima Trinidad o a Nuestra Señora, o a algún otro Santo a quien se tenga especial devoción, invocando su protección), entonces empieza cuidadosamente los trabajos con la determinación de continuar y no abandonar la empresa mientras la posibilidad de descubrimiento justifique el gasto.

GEORGIUS AGRICOLA

Quince años después de la obra de Biringuccio (1556), se publica por primera vez *De Re Metallica*, la obra que había de consagrar, con razón, a Georgius Agricola. Agricola representa el despertar al nuevo saber en las ciencias naturales, basado en la observación y en la experimentación sistemáticas, como lo representa su contemporáneo Paracelso, el de la *tria prima* (sal, azufre y mercurio), en las ciencias médicas. Agricola fue el gran avanzado de su tiempo en la cimentación de la Ciencia Deductiva a partir de los fenómenos observados. Por eso, ya que hoy se rinde diario y justo homenaje a quienes trabajan en la superestructura de la Ciencia, no debemos olvidar a quienes pusieron sus piedras fundacionales; y en este oficio, Agrícola fue uno de los operarios más cualificados.

Por lo que a nuestro tema se refiere, Agrícola dividía los cuerpos inanimados subterráneos en dos clases: *exhalaciones* y *minerales*. Los minerales solidifican de partículas de la misma o diferentes sustancias, separándose, en este caso, en una mezcla de tierra, piedras y metales. Los minerales simples son de cuatro clases: *tierras, jugos solidificados, piedras y metales*, y se distinguen por propiedades evidentes, útiles o indeseables, pero inevitables; son secos, duros, blandos, untuosos, licuables o plastificables por el agua, o no alterables por ella; el fuego o les funde, o les quiebra.

A las dificultades propias de la rudimentaria y arriesgada industria minerometalúrgica había que añadir la condena de filósofos y moralistas. *La minería —se decía— no es útil a la humanidad por-*

que, sin duda, las gemas, los metales y otros productos minerales no tienen valor por sí. La tierra no oculta y retira de nuestra vista aquellas cosas que son útiles y necesarias; por el contrario, como madre benéfica, se ofrece generosa trayendo a la luz del día abundantes, hierbas, vegetales, grano, frutas, árboles... Sin embargo entierra profundos, para que no puedan verse, a los minerales que se extraen a la superficie por hombres malvados que al decir de los poetas son el producto de la Edad del Hierro. Una referencia, sin duda a lo que Ovidio describió así en su *Metamorfosis*: *Los hombres descendieron a las entrañas de la Tierra y extrajeron riquezas, incentivos para el vicio que la Tierra había escondido en las sombras impenetrables. Entonces se produjo el hierro destructivo y el oro, más destructivo que el hierro, y llegó la guerra.*

Aquellos precursores de la moderna ecología no estimulaban así, precisamente, el interés por los minerales y su origen. El gusto se desviaba hacia otras cosas: *El alimento más dulce para el alma —según diciendo sus argumentos— es la contemplación de la naturaleza, un conocimiento de las artes más finas y de las ciencias, el entendimiento de la virtud; si el hombre interesa su mente en cosas excelentes, si ejercita su cuerpo, estará satisfecho con esta fiesta de nobles pensamientos y conocimientos, y no deseará otras cosas.*

Para Agrícola, aquellos que hablan mal de los metales y rehusan utilizarlos, no se dan cuenta de que están acusando de malvado y condenando al mismo Creador, al afirmar que *El hizo cosas en vano y sin buena causa, considerándole como autor de los demonios; opinión que, ciertamente, no es propia de hombres pios y sensibles..., providente y sagaz, la Naturaleza ha designado para cada cosa su sitio. Genera los metales en las venas y grietas de las rocas como especiales receptáculos para aquellos materiales. Los metales no pueden producirse de otra forma porque se necesitan materiales para su formación.*

Lo expuesto por Agrícola en su obra *De Ortu et Causis* en relación con el origen de las menas, puede resumirse así: Rechaza la argumentación bíblica por considerarla vulgar, y repudia lo alquímico y lo astrológico, pero opina influido por lo peripatético. Las cavidades de la Tierra se formaron por aguas subterráneas que procedían de la infiltración de aguas superficiales de lluvia, de los ríos, del mar, o de la condensación del vapor que se produce al penetrar las aguas superficiales a mayores profundidades, por efecto del calor

subterráneo, debido, a su vez, en gran parte, al quemado del bitúmen (incluido el carbón). Las cavidades y canales se llenarían de *tierra, jugos solidificados, piedra, metales y compuestos*; todos depositados del agua y jugos circulantes. Las tierras, en la idea de Agrícola, se originaban ya, por erosión, transporte y sedimentación. Cada sustancia tiene su *jugo* particular y una causa *material y eficiente*; los *jugos* se generaban o por disolución de la sustancia que llevan, o por combinación de cosas *secas* —como *tierra*— y agua.

Si el trabajo de un científico debe juzgarse por el avance que su obra supuso en el frente de la ciencia, puede decirse que lo aportado por Agrícola representa un paso adelante mucho mayor que el dado por cualquier otro observador desde entonces. Además, aparte las ideas concretas, el hecho de haber deducido sus opiniones desde la observación directa en lugar desde la especulación, fue una contribución metodológica al propio fundamento de la ciencia natural.

Agrícola se quedó corto al atribuir la formación de los canales o conductos solo a la erosión, pero pasaron dos siglos hasta que Von Oppel (1749) hizo la positiva aportación de que las vetas (grietas o canales) se pudieron formar por fisuración, aunque tampoco fue él mismo muy correcto despreciando la posible formación por erosión.

Hasta finales del siglo XVIII no fue generalmente aceptado el llenado de los conductos por depósito mineral desde disoluciones. Naturalmente las ideas de Agrícola no fueron ni inmediata ni manifiestamente aceptadas. Otros autores muy posteriores cayeron en la tentación de utilizarlas sin confesar su procedencia, confiando, acaso, que el tiempo transcurrido alejara el conocimiento de las verdaderas fuentes (Pryce, *Mineralogia Cornubiensis*, Londres, 1778; Willians, *Natural History of the Mineral Kingdom*, Londres, 1789). Pero cuando, después de Von Oppel, los principios fundamentales fueron generalmente aceptados apareció la complicada y acre discusión sobre el origen de las soluciones. Werner (*Neue Theorie von der Entstehung der Gänge*, Freiberg, 1791) ironiza la idea de Agrícola calificando de absurdo lo que llamó «diluvio universal químico» penetrando por las fisuras superficiales. No aparece claro por qué Werner está considerado como el padre de la moderna teoría en la materia a no ser ignorando los trabajos de autores anteriores sobre depósito de menas. El rechazo de este autor de la formación de soluciones en el seno de la Tierra, detuvo medio siglo el avance del pensamiento en estos temas. Sin embargo, ninguna de las propuestas originales de Werner se sostiene hoy como buena.

Pero volvamos un momento al siglo xvii para dejar consignada la aportación española al tema por obra y pluma de Alvaro Alonso Barba en su *Arte de los Metales*; *Arte* que merece un detenido análisis que dejamos para otra ocasión. No quiero, sin embargo, privarles de la delicia de escuchar algunos pasajes de su texto original: *Los mixtos que la naturaleza produce en las entrañas de la Tierra —dice— o se derriten o no; si no se derriten, o son duros, y se llaman piedras, o blandos y que fácilmente se desmenuzan en pequeñísimas partes, y se llaman tierras; y si se derriten, o vueltos a su primer forma quedan duros y aptos para estirarse con el golpe del martillo, y éstos son los metales; o no quedan con la dureza y aptitud dicha, y éstos son los que se llaman jugos. Resultan de la mixtion de aquellos cuatro primeros géneros otras diferencias de compuestos, que quien supiere contarlas bien, hallará que pueden ser once, y no más... No puede ponerse duda en que haya alguna virtud activa que engendre y haga las piedras como la hay para todas las demás cosas generales y corruptibles del Universo; pero ésta es dificultísima de conocer, por no tener lugar determinado su generación, pues en el aire, en las nubes, en la tierra, en el agua y en los cuerpos de los animales vemos que se engendran piedras. Es su materia próxima, como siente Avicena y Alberto, una mezcla de tierra y agua, que si tiene más agua se llama jugo, y si tiene más tierra que agua lo llamamos lodo.*

Teniendo como referencia las ideas de los autores ya citados (San Alberto, Biringuccio, Agricola) expuestas con mesurada fantasía, escuchen ahora la desenfadada soltura de D. Alvaro, señor cura en la imperial Potosí, cuando se refiere en su libro a la generación de los metales. Dice así: *No es maravilla que acerca de la materia de que se engendran los metales haya habido tanta diversidad de opiniones entre personas que puedan autorizarlas, pues parece que con particular providencia quiso ocultarla con ellos el Autor de la naturaleza en la oscura profundidad en que los cría, y dureza de peñas en que los encierra, para poner algún estorbo a la ambición humana. Los que se han alzado con el nombre de Filósofos, por entender en el conocimiento de las causas, dexando la materia prima por principio remotísimo de los metales, como lo es de todas las demás cosas ponderales del mundo, señalan otra, aunque también*

remota, que es cierta exhalación húmeda y untuosa por una parte, y por otra una porción de tierra viscosa y crasa, de cuya resulta una materia que no sólo lo es de los metales sino también de las piedras, porque si la sequedad prevalece se engendran piedras, y si tiene más de humedad pingue, se convierte en metal. Así lo sienten Platón, Aristóteles y sus secuaces. De la abundancia de esta humedad pura, resplandeciente y sólida procede el lustre de los metales, en que, entre los demás elementos, conocidamente predomina el del agua y así corren y se derriten al fuego... Muchos con el vulgo, por ahorrar de dificultosos discursos dicen que desde el principio del Mundo crió Dios los metales de la manera que están hoy y se hallan en sus vetas. Agravio hacen a la naturaleza negándole sin fundamento en esto la virtud productiva que tiene en las demás cosas sublunares. Demás que la experiencia en muchas partes ha convencido lo contrario... Lo propio juzgan muchos que sucede en este cerro rico de Potosí, y por lo menos vemos todos que las piedras que años antes se dexaban dentro de las minas porque no tenían plata, se sacaban después con ella, tan continua y abundantemente, que no se puede atribuir sino al perpetuo engendrarse de la plata... Los Alquimistas (odioso nombre por la multitud de ignorantes que con sus embustes lo han desacreditado) con más profunda y práctica Filosofía, haciendo anatomía de los mixtos de la naturaleza, reduciéndolos a sus primeros principios, discurren en la materia de los metales de esta manera. El sol, dicen, y todos los demás Astros con luz, o propia o prestada, rodeando continuamente la Tierra, la calientan y penetran por sus venas con la sutileza de sus rayos. Quemada así por largo tiempo, se convierte en otra substancia también térrea, como vemos que la leña y piedras se convierten en ceniza y cal. Esta tierra así quemada y cocida con el agua, se transmuta en otra cierta especie, que contiene en sí algo de la substancia de Sal y Alumbre... La experiencia ha enseñado y la razón lo persuade que el lugar más propio de la generación de los metales son las venas de la tierra que discurren por su gran cuerpo, como receptáculos principales de su humedad permanente, proporcionada a su solidez y dureza, como lo es la sangre a los cuerpos de los animales. Las peñas entre que se crían de ordinario los metales, que llamamos caxas, sirven de conductos por donde se encamina y une la virtud del calor subterráneo y el de los Astros mediante el cual se excitan los vapores, se dispone mezcla y purifica la materia de que se crían, sin dar lugar a que se divierta y desvanezca por diferentes partes. Lo que entre

caxa y caxa va, se llama veta; haylas de todos los géneros y suertes de metales, y de lo que de sus farellones ha desgajado el tiempo, o robado las lluvias, se hallan esparcidos en cerros y quebradas, los que llaman Suelos o Rodados, que son piedras de metal. El mismo principio tiene, según los que mejor sienten, el oro que halla entre las arenas de algunos ríos que no se crió en ellos, como les parece a muchos, sino en vetas de que rodó con el agua a los arroyos. Aunque esto sea como lo es lo más natural y ordinario, suele suceder a veces que en algunos parajes, o pedazos de tierra, se hallan los que llaman Criaderos, donde se engendran metales fuera de las vetas, por la disposición de la materia y pujanza de virtud material que allí concurrieron.

El qué y el cómo de las exhalaciones —azufre y mercurio, por supuesto— se interpretaron por D. Alvaro así:

Este vitriolo, por la calor del fuego subterráneo, y atracción del celeste, echa dos humos o vapores, el uno térreo sutil y untuoso, y algo digesto, que los Filósofos llaman Azufre, porque en las calidades se le parece; el otro húmedo, acueo, viscoso y mezclado de térreo sutil, que es la materia próxima del Azogue. Estas dos vaporosas exhalaciones hallan en la tierra libre y anchurosa salida, levantadas a la región del aire, se convierten en cometas, nubes, nieves, granizos, rayos, y demás cosas que en ella se engendran y aparecen... Pero si el lugar fuese angosto, y tan apretado que las dichas dos exhalaciones humosas no tengan salida, buscándola por entre los resquicios y hendiduras de las peñas o lugar mineral, se engruesan, y convierten en los que llaman medios Minerales... Si penetrando estos humos los peñascos, no hallan cierto género de Azufre lavado, y resplandeciente como plata, que es como Margarita, sin el cual no se pueden engendrar metales, se manchan las peñas de diversos colores... Si subiendo esos vapores se les opone alguna piedra tan dura que no pueden penetrarla, se convierten en perpetuos manantiales de agua, al modo que se experimenta en las ordinarias destilaciones. Pero si traspasando las peñas hallan estos dos jugos la Margarita, o Azufre lavado, casi fixo, que se dixo poco ha, deshacelo mezclándose con él, y por cocimiento sucesivo se espesa en la Mina, se endurece, y hace metal... Los más afirman ser la materia inmediata de los metales el Azogue y el Azufre, y que de la variedad de proporción en su mezcla, y de su mayor o menor purificación y eximientto, resulta la diferencia que en los metales se ve.

Se enfada el señor cura con los que se permiten dudar que el azogue y el azufre son la materia de los minerales, y les recrimina de esta suerte:

Los que no juzgan por factible, sino lo que les parece serlo a la capacidad de sus discursos (presunción indigna de hombres doctos y que a muchos que son tenidos por tales les debiera minorar el crédito) niegan al Arte la posibilidad de transmutar unos metales en otros, con razones que no sólo no convencen, pero ni aún aprietan... Dicen que los Alquimistas ignoran el modo con que la naturaleza cría y perfecciona los metales, y que yerran en decir que se componen de Azogue y Azufre; porque a ser esto así, muchos rastros y señales se hallarán de ambas cosas en las Minas de Oro y Plata, y de los demás metales, contando por la experiencia lo contrario... Poco importa lo primero, pues convenciera, cuando mucho, que de ordinario procedían mecánicamente, y no con principios científicos, los que hicieron estas transmutaciones; pero no por eso se quitaba la posibilidad y verdad de ellas... En lo segundo se conoce manifiestamente la temeridad con que se arrojan a afirmar lo que no saben. No hay cosa más experimentada entre los que tratan de metales, que la mezcla ordinaria que tienen de azufre, y su abundancia en los Minerales no es pequeña señal de su mayor riqueza... En el Azogue pasa lo propio, aunque menos advertido, por ser cosa que en los metales crudos no está tan sujeta a la vista, ni perdiéndose en humo en los que se queman se dexa conocer al olfato, como el Azufre, pero bien experimentados son sus efectos en los que con poco recato asisten a los humos de las fundiciones... Cuando lo dicho no bastara para desengaño, era de ninguna fuerza para probar que los metales no se componían de Azogue y Azufre, el decir que carecían de ello sus Minas, pues como partes componentes habrían pasado ya a otra naturaleza del todo que de ellas se hizo, dexando sus propias formas. Pero desmenuzando más estos secretos de la naturaleza sacan los Sabios (no los Vulgares) de todos los metales otra vez el Azogue, de que dicen componerse palpable y visiblemente; no escribo el modo por no ocasionar a experiencias Químicas, llenas de más inconvenientes que provechos.

Devoto, como se ve, del azufre y del azogue —además de San Bernardo, titular de su parroquia—, se declara creyente de la transmutación, y así lo deja recogido en el siguiente pasaje: *Demás de los Cielos, que como causa universal concurren a la generación de*

todas las cosas, y lo son de la de los metales, es necesaria la eficiencia de otra causa próxima, que con virtud impresa de ellos los obre en su propia materia; porque las calidades de los elementos por sí solas no son bastantes, ni están determinadas a la producción de cierto género de mixto, sino en cuanto son dirigidas de otra particular virtud, como se ve más manifiestamente en la de los animales. Esta, pues, próxima causa, y virtud mineral, usa como instrumentos de las calidades elementales y, especialmente, del calor y del frío, en la generación de los metales: con el calor mezcla uniformemente lo térreo con lo húmedo, que es la materia de que se componen: cuécelo, y lo digiere y espesa, y con el frío lo endurece y cuaxa en forma de metal más o menos perfecto, según la mayor o menor pureza que halló en la disposición presente de la materia. En esto se funda la opinión de Calistenes, de Alberto Magno, y de otros, que dicen hay sola una especie de metal perfecta, que es el Oro, y que los demás metales son sus incoaciones o principios, de donde les viene la facilidad de reducirse a su perfección, y poder convertirse en Oro todos. Los que niegan la posibilidad de transmutación de los metales, ponen mucho ahínco, en probar, que son de especies completamente distintas y que así es imposible el tránsito de unos a otros; pero ni convencen lo primero con eficacia, ni de ello, cuando se les conceda, se sigue lo segundo, pues que semejantes o más dificultosas transmutaciones se hacen por Arte y naturaleza.

Quede con esto en paz D. Alvaro, hasta otra ocasión.

PLUTONISTAS Y NEPTUNISTAS

La controversia entre *Plutonistas* y *Neptunistas* alcanzó su máximo en el siglo XVIII. El geólogo por afición James Hutton (1726-1797) fue el más significado Plutonista (*Theory of the Earth*, 1788). Atribuía la formación de las venas minerales a procesos internos de la Tierra con dos tipos de material: magmático o ígneo y cristalino o sulfurado. Por otra parte, el profesor de la Escuela de Minas de Friburgo Abraham Gottlob Werner (1749-1817), líder de la escuela Neptunista, a quien ya nos hemos referido, interpretó la formación de venas o vetas a partir de soluciones acuosas que fluyen hacia abajo a través de grietas en las rocas, erosionándolas y precipitando minerales en ellas. La controversia sigue latente pero planteada sin exclusivismos, ya que es evidente que hay depósitos relacionados con pro-

cesos magmáticos profundos, y los hay formados por fenómenos geológicos externos y corticales. Parece claro que ninguna puede dar una explicación universal de la génesis de todos los depósitos. La discusión sobre origen interno o superficial se centró en ciertos grupos de minerales, incluso de forma individualizada o, al menos, restringida.

EL ACTUAL ENTENDIMIENTO

El siglo XIX aporta, sobre todo, la racionalidad de la experimentación y con ella leyes, principios, relaciones sólidamente establecidas de causa a efecto, pruebas... Unidad en el retador mundo de los hechos. Pero no sólo se estudia lo que se encuentra, se busca lo que hace falta para salvar la armonía de la Obra, para atar los cabos sueltos del conocimiento. Y así, en poco más de siglo y medio, se buscan y encuentran 58 nuevos elementos, y se apuesta por los que faltan para que el orden racional sea completo.

Todo esto quiere decir que se va iluminando el mundo de las causas, de los mixtos, de las exhalaciones, de los jugos, de las formas; que se van entendiendo el calor y el frío; que el agua es lo que es; que con una luz integrada —masa y energía— se va aclarando el poder absoluto de los Cielos, aunque a veces se les pierda el respeto. Que desde la luna, ya pisada, se está un milímetro más cerca de entender la unidad del Universo.

¿Cómo se entiende ahora el mundo de Aristóteles, de San Alberto, de Biringuccio, de Agricola, de Alonso Barba el primer cura minero? ¿Dónde estamos? Pues, de momento, a varios siglos de ellos.

Todo ocurrió de tal manera que los elementos químicos —cuya formación se relaciona con la expansión y enfriamiento de aquel fluido densísimo (del orden de 300 millones de t/cm^3) que en el momento cero concentró toda la materia del Universo en una pequeña región del infinito— los elementos, digo, se repartieron entre las tres zonas o esferas —*núcleo, manto y corteza*— que parecen bosquejar la macroestructura de la Tierra (tabla I).

Cualquiera que sea la hipótesis que se acepte para la formación de este planeta —condensación de una fase gaseosa incandescente, o gradual agregación de partículas sólidas— debió pasar por un estado fluido o fundido en el que los elementos químicos, ya formados, se

distribuyeron de acuerdo con sus mutuas afinidades entre las diferentes fases que fueron segregándose por insolubles o inmiscibles entre sí: metálica, sulfurada, silicatada, acuosa y gaseosa (atmósfera).

T A B L A I

Volumen y masa de las distintas zonas o esferas

Zona o esfera	Espesor (Km)	Volumen ($\times 10^{27}$ cm)	Densidad media (g/cm ³)	Masa (10^{27} g)	Masa %
Atmósfera	—	—	—	0,000005	0,00009
Hidrosfera	3,8 (media)	0,00137	1,03	0,00141	0,024
Litosfera (Corteza)	17 (media)	0,008	2,8	0,024	0,4
Manto	2883	0,899	4,5	4,075	68,1
Núcleo	3471	7,175	10,7	1,876	31,5
Total de la Tierra	6371	1,083	5,52	5,976	100,00

El núcleo y el manto siguen desafiando a la imaginación y a la Ciencia que, cuando trabajan juntas, rinden hipótesis y concluyen tímidos, pero estimulantes, acuerdos que van abriendo trabajosamente el camino del conocimiento al más allá de nuestros pies.

En algún lugar, de vez en cuando, aparece la manifestación sobrecogedora de un volcán o de un sismo. La lava, el magma desbordado, la erupción violenta, el dramático temblor, advierten qué entrañas nos esperan; pero el dónde, el cómo y el por qué, siguen esperando. Al hombre le preocupa más el firmamento, se yergue arrogante sobre el suelo, pisa la tierra, desprecia el barro, admira las estrellas... Acaso conviniera cambiar el domicilio de los ángeles, traerlos a la tierra, ofrecerles cavernas refulgentes de cristales, sonoras de aguas juveniles y de órganos de piedra, catedrales a la fe que marcaran el camino al centro de la esfera.

Pero la corteza viene desafiando por igual a la codicia, a la imaginación y a la Ciencia y, poco a poco —aunque, a veces, demasiado presto— va cediendo, con sus misterios, sus riquezas para hombres que están emplazados a demostrar su inteligencia y su racionalidad

precisamente sobre la corteza de este fruto de Dios que es la Tierra.

Y todo ocurrió de tal manera que Clarke, en 1933, discutiendo sobre los resultados de más de cinco mil análisis de muestras tomadas en áreas continentales (tabla II) dedujo ya sorprendentes conclusiones que se pueden resumir en los siguientes puntos:

TABLA II

Abundancia de los elementos en la litosfera (según Clarke)

Elemento	% en peso (Clarke)	% en átomos	% en volumen
O	46,6	62,55	93,77
Si	27,72	21,22	0,86
Al	8,13	6,47	0,47
Fe	5,00	1,92	0,43
Mg	2,09	1,84	0,29
Ca	3,63	1,94	1,03
Na	2,83	2,64	1,32
K	2,59	1,42	1,83
Ti	0,44		
H	0,14		
Mn	0,1000		
S	0,0520		
Cr	0,0200		
Zr	0,0160		
V	0,0110		
N ₂	0,0080		
Zn	0,0065		
Cu	0,0045		
Co	0,0023		
Pb	0,0015		
Ga	0,0015		
Sn	0,0003		
U	0,0002		
W	0,0001		
Hg	0,00005		

1) Sumando el contenido en sólo ocho elementos (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K y Mg) se alcanza el 99 por 100 de la masa total de la corteza (obsérvese que entre ellos no está el azufre).

2) El oxígeno es, con gran diferencia, el más abundante. Representa, en volumen, casi el 94 por 100.

3) La mayor parte de los elementos metálicos de la máxima importancia y de uso corriente desde hace milenios son, realmente, poco abundantes, más bien escasos. El cobre, por ejemplo, es menos abundante que el circonio; el plomo es comparable al galio; el mercurio es más escaso que la mayor parte de las tierras raras.

4) Por el contrario, otros elementos poco conocidos son relativamente abundantes. El rubidio, por ejemplo, es comparable al níquel; el vanadio abunda más que el estaño; el hafnio, uno de los elementos más modernos, es más abundante que el boro.

Estos son algunos de los pocos datos directos obtenidos de partes accesibles de la Tierra, que, realmente, sólo representan ligeros arañazos epidérmicos.

Para completar la imagen cortical o litosférica hay que aclarar también la importancia relativa de los agregados líticos en los que se encuentran distribuidos estos elementos dentro de la corteza que, como no es aún accesible en todo su espesor, será una importancia estimada. Refiriéndose a los primeros 15 km de profundidad, lo estimado es lo siguiente: el 95 por 100 está constituido por rocas ígneas; un 4 por 100 por sedimentos (recientes o metamórficos); un 0,75 por 100 por roca silíceas, y un 0,25 por 100 por roca caliza. Granitos y basaltos constituyen las 4/5 partes de la corteza terrestre (tabla III).

TABLA III

Participación de las formas oxidadas de los elementos en la litosfera

Constituyente	% en peso
SiO ₂	60,18
Al ₂ O ₃	15,61
Fe ₂ O ₃	3,14
FeO	3,88
MgO	3,56
CaO	5,17
Na ₂ O	3,91
K ₂ O	3,19
TiO ₂	1,06
P ₂ O ₅	0,30

Estas y otras estimaciones hipotéticas, más o menos fundamenta-

das, se hacen, en el mejor de los casos, sobre datos obtenidos por procedimientos indirectos —geofísicos, generalmente— o sobre aproximaciones teóricas montadas más sobre la imaginación que sobre la medida. Y así ha de ser, porque más iluminado está ahora el cosmos que el interior de nuestra propia Tierra a sólo unos kilómetros bajo nuestros pies, hasta que podamos inaugurar una autopista al *manto* o a la discontinuidad de Wiechert-Gutenberg.

El propio planeta, como consciente de que tiene que ayudarnos a entender toda su grandeza, regurgita rocas, polvo, gases, vapores, lava, magma... Y salió la palabra que encierra, a mi entender, un concepto clave para nuestro propósito. El nombre es un acierto semántico porque, o se pronuncia como es debido, y entonces lo dice todo, o no nos dice nada. No hay producto natural o imaginado que más represente, que más admita, que más explique y que menos se conozca; donde más quepa y del que más se extraiga. Acaso el residuo fósil de la condensación de un plasma.

Nuestro *magma* es la forma material originaria de las rocas ígneas y de las fases impregnantes. Fue el *liquidus*, simple o complejo, homogéneo o heterogéneo, segregado o disperso, más o menos fluido, de un sistema de múltiples componentes cuya estabilidad estuvo definida por la compatibilidad termodinámica de su composición, presión y temperatura.

La compleja realidad del mundo mineral a nuestro alcance, y del que está fuera de él, es el resultado de la combinación de todos los elementos químicos en concentraciones y en condiciones de tiempo, temperatura y presión que no cabe describir a escala humana. Sin embargo, profundizando en su estudio, se descubre tal intrínseca armonía en tanta grandeza que nos vemos invadidos por una especie de mística de la materia inerte.

Cuando el *magma* alcanza zonas superiores, dentro de la corteza, tiene lugar una separación de materia no sólo durante la solidificación, sino, incluso, en fase fundida, en un proceso que se conoce como *diferenciación magmática*. En este complejo sistema, los constituyentes de baja y alta volatilidad se conservan en solución recíproca. Y si ese magma está localizado a cierta profundidad en el interior de la Tierra y en equilibrio bajo presión, un cambio en las condiciones de presión, temperatura y concentración produce, como en cualquier otro sistema, las reacciones correspondientes que tratan de hacerle alcanzar de nuevo el estado de equilibrio que determinan las nuevas condiciones.

La formación y posterior evolución de la corteza a partir del magma, por enfriamiento, no fue un proceso ni rápido, ni simple, ni definitivo. La historia de un magma es larga y compleja.

El magma solidificado se identifica por la roca o el mineral que formó, generalmente polifásicos. Precisamente de ahí puede deducirse que no solidificó a una temperatura fija y determinada, sino por cristalización fraccionada. Sólo las masas importantes de compuestos puros —geológicamente puros— de origen magmático, con frecuencia impregnantes, pueden asociarse a fundidos magmáticos homogéneos en todos sus estados.

Los productos finales de este proceso de consolidación, no fueron sólo rocas y minerales; hubo también fases gaseosas y soluciones acuosas más o menos hipercríticas.

La naturaleza de las fases condensadas —sólidas o líquidas— estaría determinada por las condiciones del sistema multicomponente que constituye el conjunto de todos los elementos —cuya abundancia relativa depende de propiedades nucleares más que químicas— y quedó establecida por las condiciones que existieron en el Universo primigenio y por los subsiguientes procesos de su evolución. Según parece, en ese sistema el oxígeno fue mucho más abundante que el azufre, y ambos, juntos, insuficientes para combinarse con la totalidad de los elementos electropositivos, a pesar de los valores *Clarke* para la corteza.

El hierro, por ejemplo, teniendo en cuenta su relativa abundancia, estaría presente en todas las fases condensadas: en la metálica, en la iónica de los silicatos y óxidos, y en la semimetálica (covalente) de los sulfuros fundidos. Los elementos más electropositivos que él le desplazaron de su silicato fundido y fueron concentrándose en la fase silicatada. Los menos electropositivos se concentrarían en la fase metálica, disolviéndose en ella, al ser desplazados por el hierro en el fundido iónico en que pudiesen encontrarse, o directamente desde el estado elemental que nunca perdieron.

La fase sulfurada, por su parte, fijó o incorporó a aquellos elementos que forman compuestos homopolares —covalentes— con el azufre, y a los metaloides, que son incompatibles con un medio o fase iónica. Estos elementos fueron, precisamente, los metales que forman el grupo de los sulfuros de la marcha analítica convencional.

En esta escala macrotelúrica que estamos comentando, Vogt (1926) advirtió ya la semejanza de los magmas metálico-silicatado-

sulfurados con las fases obtenidas en algunas operaciones metalúrgicas con fusión, en las que precisamente se saca buen partido del hecho de la insolubilidad recíproca de metales reducidos, silicatos y sulfuros (matas) en estado fundido. La fase sulfurada, según Brown (1948), puede situarse en la parte superior del *manto*, dispuesta a que una tectónica favorable la impulse a través de la corteza impregnando rocas porosas o llenando cavidades y grietas.

Pero volvamos a los números de Clarke. ¿De dónde proceden los metales de nuestra vida, los que todos tenemos en casa, los que todos utilizamos y de los que todos nos beneficiamos en sus más variadas —vulgares o sofisticadas— aplicaciones? Naturalmente se encontraron y extrajeron de la corteza terrestre en uno de los quehaceres humanos paradójicamente más antiguos, que inspiró el asombro, desarrolló la intuición, perfeccionó la inteligencia, racionalizó la ciencia y desorbitó nuestra civilización. Me refiero a la metalurgia.

LAS CONCENTRACIONES LOCALIZADAS DE METALES

Si estos metales están en la corteza de la Tierra y Clarke no los encontró sino en trazas, quiere decirse —y así es— que, en la forma que sea y por el proceso que corresponda, estos metales tienen que estar concentrados en ciertos puntos singulares del planeta. Detrás de esta feliz realidad está la buena y la mala ventura de nuestro mundo. Lo que fue consecuencia de procesos geo-físico-químicos de separaciones y concentraciones de elementos y de fases siguiendo, en último extremo, estrictas leyes termodinámicas, el hombre, organizándose en comunidades no sólo autónomas sino insolidarias y, a veces, hostiles, ha transformado en una lotería irrepetible de recursos minerales que, en vez de tocar al mundo entero, tocó por continentes, por países, por nacionalidades, por regiones, por provincias, por pueblos y hasta por barrios. Pero no habrá más sorteos; y así estamos.

El contenido mínimo de una mena en su metal, que permite una explotación económicamente rentable (tabla IV) es siempre mucho mayor que el *Clarke* (valor de la abundancia media del correspondiente metal en la corteza). Así, para el plomo es dos mil quinientas veces mayor; para el manganeso, trescientas cincuenta veces; para el níquel, mil quinientas veces; para el cobre, ciento cuarenta; para el oro, de mil a dos mil veces; para el estaño, doscientas cincuen-

ta veces; y para el hierro, de cinco a seis veces. No obstante, si se comparan las reservas mundiales de ciertos metales en yacimientos explotables con el número de kilómetros cúbicos de rocas en los que se encuentra, en forma dispersa, una cantidad equivalente en la corteza, se pone de manifiesto la poca importancia relativa del metal localizado en el yacimiento, comparada con las gigantescas masas de él diseminadas por toda la litosfera.

T A B L A I V

(Según Schneiderhöhn, 1962)

Metal	Concentración media en la corteza terrestre		Leyes mínimas de yacimientos beneficiables ‰	Factor de concentración
	g/t	‰		
Al	813000	8,13	36	3,7 x
Fe	50000	5,00	25 - 30	5 - 6 x
Mn	1000	0,1	35	350 x
Cr	200	0,02	30	1500 x
Ni	80	0,008	1,5	188 x
Zn	80	0,008	4	500 x
Cu	70	0,007	1	140 x
Sn	40	0,004	1	250 x
Pb	16	0,0016	4	2500 x
Ag	0,1	0,00001	500 g/t	5000 x
Au	0,005	0,0000005	5 - 10 g/t	1000 - 2000 x

1) Depósitos en rocas, no en placeres.

La acumulación natural en ciertas zonas de la corteza de materiales útiles que pueden beneficiarse con provecho económico se conoce como *depósito* o *yacimiento*. Estos yacimientos son relativamente pequeños en sus dimensiones, comparados con el conjunto de la corteza rocosa. Pero un yacimiento no es un ente independiente ni en su origen, ni en su ubicación, ni en su destino. Yacimientos minerales y rocas son unas realidades materiales cuyas dimensiones, forma, clase, composición y, en parte, origen, están geológicamente relacionados y así deben estudiarse y entenderse.

Como más adelante vamos a centrar nuestro interés en el yacimiento de Almadén, diremos ya que por su abundancia global esti-

mada para el mercurio en la corteza (0,00005 por 100), de no ofrecérsenos concentrado en algunos puntos del planeta (en este particular metal a España le cayó «el gordo» en Almadén), para obtener los gramos encerrados en un termómetro clínico, tendríamos que haber operado, por impensables procesos, sobre, aproximadamente, 10 toneladas de roca. Pero el mercurio en la mena de Almadén está *trescientas mil veces* más concentrado que la abundancia global señala (tabla V). Esta realmente fabulosa concentración, está dando

TABLA V

<i>Composición química de una muestra rica en mena de Almadén (según Saupe)</i>		<i>Correspondencia mineralógica estimada</i>	
	%		%
SiO ₂	81,45	Cuarzo	80,3
Al ₂ O ₃	1,24	Cinabrio	15,9
Fe ₂ O ₃ (total)	0,14	Mercurio metálico	0,7
MgO	0,06	Pirita	0,2
CaO	0,06	Caolinita	2,2
Na ₂ O	0,02	Sericita	0,9
K ₂ O	0,25	Dolomita	0,2
TiO ₂	0,09	C. orgánico	0,1
P ₂ O ₅	0,02		
CO ₂	0,30	TOTAL	100,5
H ₂ O (total)	0,30		
S	2,25		
Hg	14,40		
TOTAL	100,58		

mercurio desde hace dos mil años, para todo: para perderse en el empirismo; para avalar trampas de emperadores; para pagar la cuota al desgobierno, a la despreocupación, al abuso y a la incompetencia; y para, con el resto, beneficiar plata en Nueva España, o aceptar mercados a bajo precio. Cuando tengan ocasión, tómense Vds. la molestia de localizar el punto que correspondería a Almadén en un globo terráqueo y podrán apreciar la insignificancia dimensional de tan singularísimo yacimiento tanto por su riqueza como por su potencia. ¿Por qué y cómo, precisamente allí?

Desde un punto de vista global, la propia corteza es un gran yacimiento, una gran *mena* excepcionalmente rica en minerales como cuarzo y feldespatos que, curiosamente, se supone que, al menos, escasean en el manto.

IDEAS GENÉSICAS

Para la historia general de la Tierra, el capítulo de la génesis de los minerales que con la ganga forman la mena —el yacimiento— tiene una evidente importancia; pero es que, además, aporta conocimientos que ayudan a beneficiar mejor esta riqueza. Sin embargo, no se puede estar tan seguro por lo que a la historia general del hombre se refiere, según la estamos escribiendo; acaso valiera la pena esperar a que, por la fe o la ética, domásemos el instinto y nos pusiéramos, debajo de Dios, a la altura de la Ciencia.

No se podrá estimar con base científica un recurso mineral si no logramos interpretar, con la mayor certeza posible, el proceso que llevó a su formación. El estudio de la textura y estructura de las menas, ayuda a establecer la evolución del proceso de acumulación del mineral —es decir, de la formación del yacimiento— distinguiendo sus sucesivas fases o estados. Las menas se formaron durante un largo período de acumulación de mineral en un proceso genésico único (magmático, pegmatítico, hidrotermal, meteorización). Los procesos de formación de menas son, básicamente, los de formación de rocas.

El proceso que se formule deberá ser coherente con los hechos y con las hipótesis aceptadas hasta el momento. Y es aquí, al formular los distintos procesos mineralogénicos, donde la imaginación, y hasta la fantasía, se multiplican en propuestas que, como son muchas —demasiadas— en ellas caben las contradictorias, las inverosímiles, las ligeras... y también las sólidas, las prudentes, las científicamente cuidadas, que suelen ser las de menor alcance. Esta situación no tiene nada que extrañar; el tema es tan importante como cautivador, e implica hechos y condiciones tan distantes del hombre en el espacio y en el tiempo, y en los valores de variables indiscutibles, que no tenemos más remedio que suplir con imaginación, y hasta con fantasía —enmarcadas, dentro de lo posible en el rigor científico— la falta del a veces imposible experimento. Por eso las *rocas permanecen aunque las hipótesis pasan* (Roubault).

El tema invita no sólo a la reflexión, sino a la meditación por su misma grandiosa naturaleza. Al especular, el rigor se afloja por hechos sorprendentes, imprevisibles, tanto a escala cósmica como a la microscópica. Casar los hechos observados, evidentes, en estas dos escalas, y hacerlo dentro de un esquema científico trazado por astrónomos, físicos, químicos, geólogos y biólogos, es, por ahora, sólo un plausible propósito. La naturaleza resulta ser la integral de todas las leyes, descubiertas o no, que se le ofrecen al hombre como hechos.

Estamos, pues, muy lejos de poder formular con precisión las condiciones en que la naturaleza, obedeciendo a sus propias leyes, dio lugar a la formación de menas.

La Tierra, en un principio indiferenciada, a elevada temperatura, viscosa y newtoniana, se ve afectada durante el enfriamiento por unas corrientes internas a las que se atribuye la primera concentración de metales pesados en un núcleo, mientras que los constituyentes siálicos, ligeros, quedaron en la superficie ocupando, probablemente con poca diferencia, un área que representa el 29 por 100, el actual área continental.

El núcleo diferenciado y crecido, ya no va a participar en los movimientos o corrientes que, en los dilatados tiempos que siguieron se localizan, posiblemente, en el manto. Es en esta fase, según los autores que se ocupan de esta temprana circunstancia de la Tierra, cuando la masa continental siálica pudo llegar a fraccionarse. La desgarradura oceánico-atlántica —relativamente reciente, 180-200 millones de años— prueba, con la correspondencia de sus contornos, la rigidez de aquella masa en el momento de su rotura. El deslizamiento se hizo sobre un manto fluido, cuyas corrientes ascendentes dieron lugar, en el espacio entre las masas siálicas, a los dorsales oceánicos.

Cuando el manto mismo cristalizó, se consolidó, terminó aquella fase de la historia de la Tierra y empezó la que aún vivimos. El manto ya no es viscoso y newtoniano, dicen los geofísicos, y, si fluye, será con otras leyes, en una especie de flujo plástico.

Las teorías mineralogénicas están, en general, especialmente interesadas en el problema del transporte, del movimiento, si por movimiento se entiende lo que el franciscano William Ockham (1285-1349) enunciaba como *la reaparición de una cosa en un sitio diferente*; peregrino enunciado que algunos geólogos estiman muy adecuado para describir la génesis de los minerales.

Con ocasión de un reciente simposium sobre el papel de los procesos volcánicos en la génesis de las menas se dijo que la exploración del fondo marino, que con tanto interés como intensidad se está llevando actualmente a cabo, ha demostrado que, ciertamente, hace treinta años no conocíamos todo sobre los metales. Noticia fresca, por marina, porque seguimos muy lejos de conocerlo.

LA ACTUALIDAD NEPTUNISTA

Si hubiera que expresar en pocas palabras el planteamiento del proceso mineralogénico por transporte, cabría hacerlo bajo el siguiente epigrama: «Dadme un fluido, energía bastante, y tiempo, y depositaré donde se quiera los millones de toneladas de mineral que se necesiten». La imaginación se supone.

Pero para que un fluido se desplace deberá existir un gradiente de temperatura, de presión, o de ambos. Se piensa que el más importante a estos efectos es el de temperatura. En el transporte de materia por conducto de un fluido intervendrán:

1. Los gradientes (de temperatura y de presión).
2. La solubilidad, propiedades químicas, y actividades de todas las especies en un disolvente dado.
3. El volumen del fluido y las veces que su flujo pase por un determinado punto.
4. Su velocidad.
5. La masa útil de la roca origen del mineral transportado y la capacidad de su destino.
6. La continuidad y la capacidad del foco de energía que produce el gradiente.

Admitido un proceso de transporte en el que intervengan, por lo menos, estas variables, es evidentemente muy difícil poder enunciar leyes simples para tan complejo fenómeno como es la formación de una mena. Por eso se recurre a hacer simplificaciones apoyadas en ciertas observaciones.

Por ejemplo, se admite que importantes masas ígneas se están acercando continuamente a la superficie de la corteza. Al fondo oceánico se ha estimado que llega magma basáltico a razón de 10 km³ por año, cuya masa se enfría por un flujo convectivo del agua de mar. La energía así disipada podría calentar —se sigue estimando—

40 km³ de ese agua a 300° C, y se asegura que a esa temperatura la extracción metálica es posible. En esas condiciones, la solubilidad de metales como el cobre y el cinc alcanzan valores de varias ppm en agua de mar caliente. Si la solución así formada se desplazase, y el entorno fuese el apropiado, podrían precipitarse sulfuros metálicos.

El H₂S —o, al menos, el S⁼— componente tan importante en la hipótesis de formación hidrotermal de menas sulfuradas, se dice originado en aguas sulfatadas profundas, que circulan en contacto con rocas bituminosas, con la intervención de bacterias reductoras de sulfatos; la reacción que se propone es la siguiente:



Partiendo del dato experimental de la concentración en cobre (4 ppm) que se alcanza cuando una *andesita* (roca eruptiva joven) se lixivia por una solución salina a 400° C, se puede calcular que los 40 km³ de agua de mar a que nos hemos referido, podrían transportar $1,6 \times 10^5$ t de Cu por año cerca de la superficie, lo que supone que, en el tiempo necesario para que crezca un buen árbol (cientos de años, aproximadamente), se podría movilizar materia suficiente para formar un gran yacimiento. Solo falta aclarar cómo y dónde se ha de depositar, y por qué de forma localizada.

También se han hecho estimaciones contando con la capacidad energética de los *plutones* (masas de rocas eruptivas de emplazamiento profundo). Atribuyéndoles un volumen de 500 km³, uno solo de estos plutones podría calentar 100 km³ de agua a 300° C, con lo cual se podrían formar depósitos de cobre del orden de 10⁵ t, de una sola pasada. Así como suena.

La mezcla de fluidos o soluciones de diferente origen y características químicas, y la disponibilidad de energía térmica —del estado magmático— por circulación convectiva —simple o combinada— de los fluidos, son circunstancias a las que se reconoce la facultad de promover el depósito de menas. Launay, geólogo francés, llamó a éstos depósitos *hidrotermales*.

Para cerrar esta referencia a las estimaciones, dejaremos constancia de una de carácter más general: un volumen de roca o magma original de 10³ km³, que contuviera un determinado metal en una concentración de 10 ppm, y que hubiera estado afectado en toda su masa por un circuito hidrotermal de extracción y transporte, terminando con el depósito final en una mena del 1 por 100 de riqueza.

el depósito así formado ocuparía 1 km^3 , y la masa total de agua movilizada para esta disolución y transporte al máximo de sus posibilidades habría sido de $3 \times 10^{12} \text{ tm}$, equivalente a $3 \times 10^4 \text{ km}^3$, o sea $2/3$ del mar Mediterráneo.

El agua de los fluidos hidrotermales en la epizona continental (5-10 kilómetros superiores de la corteza) o es meteórica, o es constitucional, o es de procedencia marina en la parte situada bajo los fondos oceánicos.

A los fluidos magmáticos residuales de la cristalización del magma se les atribuye un papel muy importante en la formación de los depósitos subvolcánicos hidrotermales. El agua magmática o *juvenil* se separa de los fundidos al consolidar, por enfriamiento, y formar rocas ígneas. Del 8 por 100 en peso que se supone contiene un magma, el 1 por 100 quedaría retenido como agua de cristalización y el 7 por 100 que se desprendería supondría, aproximadamente, 0.2 m^3 por metro cúbico de fundido. La migración de este agua es parte de esta compleja historia.

Para que pueda formarse según este esquema un depósito mineral —una mena— han de coincidir varios factores favorables. Cuando seamos capaces, no solo de enumerarlos, sino de atribuirles su importancia relativa en cada caso, de establecer el mecanismo individual, y una asociación y coordinación coherente del conjunto proponiendo modelos serios, lógicos y científicos, se estará en el camino de, entendiendo ese fenómeno natural tan importante como asombroso y retador que es un yacimiento, orientarse mejor en la prospección de los depósitos aún ocultos.

En principio, se podrían enunciar los siguientes requerimientos como esenciales para la formación de un depósito mineral según una interpretación hidrotermal:

1. Una masa mineral original de la que se pueden extraer, por lixiviación, los componentes de las menas.
2. Un fluido activo que disuelva y transporte a los componentes del mineral que haya de depositarse.
3. Una roca suficientemente permeable a la solución (por porosa o por fracturada).
4. Un foco de energía que mantenga el flujo hidrodinámico por el que se transfiere una masa de materia desde su ubicación primitiva, donde se encontraba en forma dispersa o diluida, a otra en la que se deposita en forma concentrada. Este foco de energía deberá tener suficiente capacidad para mantener el flujo durante el

tiempo necesario para formar un gran depósito (yacimiento), y el flujo conservará su circuito para que el contenido mineral pueda precipitarse de forma continua en un lugar geológico concreto.

5. Un mecanismo que produzca una precipitación selectiva, persistente y localizada, para que pueda formarse un depósito suficientemente grande y concentrado en ciertos elementos, como para que tenga un interés económico.

Para quienes han ido enriqueciendo con sus ideas esta hipótesis, o están de acuerdo con ella, la base fluida fue agua de mar que circuló por convección hidrotermal a través de un medio permeable. La energía calorífica la obtuvo del magma basáltico que alcanzó la base de la corteza oceánica. Durante su fluir descendente, alteró a las rocas o lava volcánicas, y durante su fluir ascendente precipitó los sulfuros. El disolvente o recirculó o volvió a la reserva oceánica. Así de complejo y de sencillo.

En este esquema general caben tantos matices como exige la realidad múltiple y variada del mundo mineral. Pero cuando se trata de matizar, el esquema general se difumina, la trama se cierra, y se pierde permeabilidad para el razonamiento.

Por ejemplo, según los autores que se ocupan de este tema, la masa mineral original puede ser sólida, o total o parcialmente fundida, y advierten esos autores que, mientras esa masa original estuvo parcialmente fundida, los fluidos hidrotermales, probablemente, solo tuvieron acceso a la parte externa de esa masa si no fueron ellos mismos parte del propio magma; sólo si lo fueron, la extracción alcanzaría a su interior. Sin embargo, cuando la masa original fuese esencialmente sólida se comportaría como un medio más o menos poroso frente al fluido, y precisamente esta porosidad la distinguiría de las rocas adyacentes. El proceso imaginado sería una especie de percolación telúrica. En cuanto al transporte de la materia extraída se atribuye a una columna de agua supercrítica.

Razón tenían nuestros clásicos: El agua es, pues, elemento clave en el proceso de mineralización, ya que enlaza —disolviendo, transportando y depositando— las dos masas minerales: la original y la final —el yacimiento— y, además, lo hace de forma selectiva, lo cual es uno de los aspectos más sorprendentes para quien por primera vez se encuentra con la hipótesis, dando la impresión de qué, para quienes la manejan, este importantísimo detalle no merece un comentario.

La idea es que existe agua en todas las geoesferas de la Tierra.

—excepto en el núcleo— constituyendo del 10 al 15 por 100 de la masa total; que hasta los 6-8 km de profundidad el agua puede estar en estado sólido, líquido, vapor o gaseoso; a mayores profundidades solo en fase vapor. Pero en zonas más profundas, a presiones ultraelevadas, puede de nuevo pasar a fase gaseosa —supercrítica— con densidades de 6 a 8 g/cm³.

La existencia de agua en el interior de la corteza parece indiscutible. Se dice haber identificado masas circulantes hasta a 10 km de profundidad, con un caudal medio de 1 t por segundo, y se interpretan como la parte superior de sistemas más profundos que obtiene su energía del manto que, por cierto, se considera *seco* (menos del 0,1 por 100 de agua).

Para algunos autores existe un sistema hidrotermal supercrítico profundo, y una zona superficial subcrítica y húmeda; lo cual es importante porque no es el cambio de estado del agua y su posible efecto sobre su capacidad disolvente lo que más contribuye al resultado final, sino que la presencia de dos fases acuosas reduce drásticamente la permeabilidad efectiva del medio, ya que ésta está determinada por la geometría de los poros solo cuando el fluido es monofásico, pero cuando hay dos fases —líquida y vapor— la primera restringe el paso de la otra.

Los minerales de origen hidrotermal se acumulan o por depósito en cavidades internas de las rocas, o por un supuesto proceso de reemplazamiento. La forma de las masas mineralizadas en los depósitos hidrotermales depende así, por su parte, de la de las cavidades que alojan al mineral, y, por otra, del perfil de las rocas supuestamente reemplazadas. Los yacimientos así formados estarán bordeados por aureolas de mineralización difundida que se atenúa hacia la periferia, de tal manera que la masa mineralizada no presenta límites definidos.

La porosidad efectiva —relación entre el volumen de porosidad interconectada a través de la cual pasa el fluido, a volumen total de la roca— aumentará por lixiviación y se reducirá durante la mineralización. La permeabilidad de la roca —capacidad para permitir el desplazamiento del líquido a su través— depende del tamaño de grano y de su configuración, y de la disposición de los poros, así como de la dirección del flujo según la textura de la roca. También de la temperatura, ya que el fluido elige para su desplazamiento conductos calientes; las rocas frías actúan más bien como pantallas.

Es típico de las aguas termales, tanto de volcanismo reciente-

mente extinguido como del actual, no solo la precipitación de productos minerales a su paso por fracturas y cavidades, sino la alteración hidrotermal de la roca próxima, según su propia naturaleza y la de la solución. Pero de la observación actual de estos hechos no debe deducirse que ellos representan necesariamente a los que dieron lugar a las mineralizaciones que nos ocupan.

Aún cuando se piense en soluciones hidrotermales como vehículo de transporte y medio de precipitación, el fundido magmático sigue siendo el origen principal de la materia mineral que extraen, transportan y depositan, todo ello de forma sorprendentemente selectiva. Como todo fundido magmático contiene los elementos necesarios para abastecer a volúmenes de soluciones hidrotermales mucho mayores que los necesarios para los mayores depósitos, lo importante —y aún oscuro— es, insistimos, el mecanismo de extracción, transporte y depósito.

Una vez más parece, pues, que el problema está en definir qué se entiende por solución hidrotermal y en concretar los fenómenos que la producen, que la mueven, y que la destinan. Es decir:

- a) Origen, naturaleza y estado del disolvente.
- b) Emplazamiento del soluto.
- c) Naturaleza de la solución (iónica, molecular, coloidal).
- d) Estado físico del fluido (monofásico, polifásico, supercrítico, disperso).
- e) Propiedades del mismo (fluidez, selectividad disolvente, movilidad, densidad, temperatura).
- f) Depósito del soluto.
- g) Destino de la solución agotada.

La cristalización de un magma granítico de localización profunda se estima completa entre 800 y 1.000° C y ello, unido a otros datos sobre temperatura de exhalaciones, etc., ha permitido sugerir que el depósito hidrotermal se inicia entre 700 y 600° C, disminuyendo gradualmente hasta los 50-25° C. Los más prolíficos se sitúan entre los 400 y 100° C.

Muchos menos datos hay para poder estimar la presión a la cual se produjeron los depósitos hidrotermales. Se admite que la mineralización por soluciones hidrotermales no tuvo lugar en todo el espesor cortical, pero no se sabe si hay depósitos subcorticales, y tampoco está claro hasta qué punto la presión corresponde a la profundidad de formación.

Aunque se han detectado huecos o vacíos, e incluso fisuras, en

rocas duras hasta a 20 km de profundidad, el número de depósitos minerales de todo tipo disminuye rápidamente con la profundidad a partir de 3.500-4.000 m, no habiéndose encontrado ninguno por debajo de los 4.500 m.

Falta por definir, con la menor ambigüedad posible, qué se entiende por solución hidrotermal. Si lo que se postula es que el agua es en esos sistemas componente mayoritario y disolvente, los depósitos de cinabrio no caben en su físico-química por extraordinarias que se imaginen las condiciones. Si lo que se quiere representar es un *fluido* complejo, formado mayoritariamente por S y Hg, y también H₂O, que pudiera interpretarse como un fundido magmático residual en el que se hubieran segregado los componentes más volátiles, entonces estaremos en el camino de lo verosímil y tendremos una interpretación a nuestro alcance.

El carácter químico de las soluciones hidrotermales magmatogénicas y su evolución, tanto en la cámara magmática como fuera de ella, es hipotético y controvertido. Los datos contradictorios que se aportan de las medidas hechas en surtidores hidrotermales actuales, no aclaran el problema.

No se conoce la composición de las soluciones hidrotermales; solo puede estimarse, indirectamente, a partir de las actuales aguas termales y de las inclusiones gas-líquido encontradas en los minerales, aunque, por tratarse de soluciones exhaustas, sólo tienen una relación remota con los fluidos primarios.

La precipitación del mineral de una solución iónica exigiría la saturación y la disminución de la temperatura, pero, pensando en soluciones en medio acuoso, la dificultad realmente insalvable es la pequeña solubilidad de la mayor parte de los minerales de yacimiento, sobre todo de los sulfuros. Se ha calculado que para depositar unas pocas toneladas de sulfuro de cobre —cuya solubilidad a 100° C como Cu S es de $4 \cdot 1 \times 10^{-13}$ g/l— se necesitaría que una masa de agua equivalente a un Mediterráneo pasara por las discontinuidades de la roca a mineralizar, cuya permeabilidad se iría reduciendo al progresar el depósito.

Suponiendo una solución que contuviera 10^{-7} g de Zn/litro, para depositar 1 tm de metal se necesitarían, como mínimo, 10^{10} m³ de solución, que es lo que descarga en el Atlántico el padre Duero en diez años. Una solución de estas características circulando a razón de 1 m³/seg tardaría en depositar 1 t de cinc, aproximadamente, trescientos años, suponiendo que precipitase todo el Zn disuelto.

T A B L A V I

Solubilidad en agua (g/l) de algunos sulfuros metálicos a distintas temperaturas (según Verhoogen, 1938)

Temperatura	ZnS	PbS	CuS	HgS	Ag ₂ S	Cu ₂ S
25° C	1.42×10^{-7}	8.65×10^{-9}	2.4×10^{-13}	1.0×10^{-18}	3.8×10^{-13}	4.8×10^{-10}
100° C	3.6×10^{-4}	8.9×10^{-8}	4.1×10^{-13}	2.2×10^{-17}	5.5×10^{-13}	4.0×10^{-11}
200° C	2.2×10^{-2}	2.1×10^{-6}	4.6×10^{-12}	6.4×10^{-16}	3.3×10^{-12}	5.6×10^{-10}
300° C	0.8	1.6×10^{-5}	2.3×10^{-11}	5.6×10^{-15}	1.4×10^{-11}	2.6×10^{-9}
400° C	5.9	2.1×10^{-4}	7.8×10^{-11}	3.1×10^{-14}	2.3×10^{-11}	7.3×10^{-9}

Cu₂S α

Cu₂S β

Para formar el gigantesco cristal de blenda acaramelada (esfalerita, ZnS) de aproximadamente 500 kg de peso, propiedad de la R. C. A. de Minas que lo extrajo de las entrañas de Peña Santa (Picos de Europa), se habría necesitado la separación *cuantitativa* del ZnS contenido en millón y medio de m³ de solución saturada a 100° C (solubilidad $3,6 \times 10^{-4}$ g/l).

Y si se tratara de 1 t de cinabrio cuya solubilidad en agua a 100° C es de $2,2 \times 10^{-17}$ g/l, el volumen de solución saturada hubiera sido de $4,5 \times 10^{10}$ km³, que equivalen a diez mil Mediterráneos.

Para salvar, en parte, esta insolubilidad natural se postula la posible formación de polisulfuros o sulfuros complejos, algo más solubles; pero esto, que es un hecho experimental, desplaza el problema a elucubrar sobre el origen de los reactivos y condiciones necesarias: ¿De dónde el Hg⁺⁺? ¿De dónde el S=? ¿De dónde la alcalinidad requerida?

La idea del transporte en forma de soluciones coloidales es igualmente difícil de sostener por la improbabilidad de que se originen soluciones coloidales en una cámara magmática a tan elevadas temperaturas (si acaso aerosoles, lo cual es otra fantasía), y porque la problemática solución coloidal no resistiría la coagulación durante el laberíntico y mudable transporte. En todo caso se podría admitir el depósito coloidal en ciertas condiciones, pero no el transporte.

Otra idea que se ha aportado es que, por especialísimas condiciones —tan especiales que ni se citan— la solución contendría el metal en forma iónica, pero el H₂S sin ionizar (?).

El movimiento de las soluciones hidrotermales se trata de explicar, además de por circulación térmica (gradiente de temperatura), por presión hidrostática, por presión litostática sobre fluidos en cámara magmática, por succión a espacios vacíos creados tectónicamente, y por presión de la fase vapor acumulada. Es decir, por gradientes de presión o de temperatura. Pero ¿y el flujo? ¿Cómo se mantiene ese gradiente para que el movimiento o la circulación que se postula no se interrumpa durante centenares de miles de años?

En cuanto al depósito, a la precipitación, se han traído a cuento todos los posibles fenómenos físicos y químicos:

- a) Reacciones de intercambio.
- b) Mezcla de soluciones.
- c) Modificación del pH.
- d) Reacciones con la roca.

- e) Coagulación de coloides.
- f) Efecto filtrante.
- g) Adsorción.
- h) Efecto del campo eléctrico natural.
- i) Cambios de temperatura.
- j) Cambios de presión.

Con el nombre de metasomatismo se designa un proceso geológico por el cual una roca se altera por disolución de algunos de sus minerales componentes (pelásómicos) a la vez que se depositan otros nuevos (metasómicos), y ello sin que la roca afectada pierda su solidez. Como en tantas otras interpretaciones mineralogénicas, en el metasomatismo se idealizan —más que se idean— procesos que, aunque se apoyen en fenómenos conocidos y, por lo tanto posibles, son difíciles de imaginar a escala geológica por increíbles valores que atribuyamos a variables como la presión o la temperatura. Si cada fenómeno sorprendido en alguna muestra más o menos curiosa y singular, se utilizase como justificante de una teoría, éstas —como de hecho ocurre— tendrían que multiplicarse para poder cubrir las muy numerosas especies minerales.

Todo, o casi todo lo físico-químicamente previsible e imprevisible incluido, se ha producido en la naturaleza; por eso la interpretación físico-química precisa y local no es bastante. Hay que contestar a interrogantes más generales que se refieren a la estructura de la gran masa mineral, a su disposición espacial, a su ordenamiento temporal, a su permanencia, o a su metamorfosis. Por ejemplo, el depósito actual de sales de mercurio en algunas manifestaciones hidrotermales no representa la forma que los yacimientos explotables de este metal pudieron producirse, sino la revelación de que una mineralización profunda está siendo afectada por aguas o vapores.

Elementos importantes en estas hipótesis son los conductos o canales mineralizantes; detalles geológicos que representan los puntos de acceso de fundidos y de soluciones desde los profundos orígenes del yacimiento. Un hecho notable se registra en relación con estos conductos: que no siempre están ellos mismos mineralizados, aunque presentan trazas o restos.

La temperatura de formación de los depósitos no aclara necesariamente su génesis, como una misma temperatura biológica en diversos enfermos no significa que padezcan la misma enfermedad. La temperatura en el momento de formación, así como la profundidad

a que tuvo lugar, son muy difíciles, si no imposibles, de determinar con suficiente aproximación; por eso la clasificación de los depósitos se hace bajo supuestos, más que por observaciones. La situación no se ha aclarado mucho cuando se han podido determinar de forma precisa esas condiciones porque se llega a la conclusión de que la misma roca pudo formarse en un amplio margen de valores para las variables del sistema.

Los múltiples y complejos intentos de clasificación demuestran la falta de bases sólidas para la interpretación del fenómeno geológico de la mineralización en sí.

LA ACTUALIDAD PLUTONISTA

Entre 1925 y 1930 cobró nuevo impulso la hipótesis plutonista. El hecho magmático inspiró interpretaciones más rigurosas a la luz de la Ciencia y llegó ya a postular la inyección de un fundido de sulfuros para la formación de depósitos piríticos. Efectivamente, algunos depósitos masivos de sulfuros se han relacionado con volcanismo submarino y con intrusiones subvolcánicas, pero no abundan las referencias a otras mineralizaciones metálicas producidas por actividad volcánica subatmosférica.

Estos depósitos volcanogénicos no se producen, pues, por concentración de su contenido metálico durante las últimas fases de consolidación de un cuerpo magmático intrusivo, ni después de una erupción volcánica del magma, sino mucho antes: durante la diferenciación que se produce en la pre-consolidación. El producto así diferenciado o segregado fue expulsado o eruptado como un magma andesítico, y siguió después su proceso de enfriamiento y consolidación.

En los depósitos epitermales —ubicados a pequeñas profundidades, entre 100 y 1.000 m y, normalmente, en rocas volcánicas— el mineral llena fracturas preexistentes. Se trata principalmente —pero no exclusivamente— de minerales de metales preciosos (Ag, como argentita o acantita; Au, nativo; Pb y Zn, como galena y esfalerita; Hg, como cinabrio; sulfosales con Sb).

Parece ser que éste es el origen de la mayor concentración de Ag conocida, la que hace de Méjico el primer país productor del mundo (solo de Pachuca y Guanajuato se calculan extraídas 30.000 t). Y

epitermales eran también los otros yacimientos hispanoamericanos que se explotaron a partir del siglo XVI.

Es, también, el caso de la magnetita del famoso Cerro del Mercado que fue extruida en forma de lava. Estos fundidos de magnetita, conteniendo fósforo en solución, se segregaron de un magma por inmiscibilidad en fase líquida. El contenido en fósforo de ese fundido magmático reduciría su temperatura de fusión —acaso a 800 ó 1.000° C—, lo cual permitió la erupción, que también pudo estar favorecida por un elevado contenido en volátiles.

El yacimiento de Río Tinto se ha calificado como volcansedi-mentario, pero al Dr. Sato, por ejemplo, no le satisface el modelo genético de agua de mar recirculante por dos razones: primera, porque los datos isotópicos del Pb eliminan toda posibilidad de una lixiviación de las rocas base; y segundo, porque la temperatura y la capacidad disolvente con respecto al cobre, solo justificaría un contenido de este metal inferior en dos órdenes de magnitud a la que realmente tiene. Las notables analogías que se han encontrado con los depósitos de Kusoko (Japón) —contemporáneos de la última fase del intenso volcanismo que comenzó a principios del Mioceno— han sugerido una génesis por diferenciación de un magma detenido en su elevación al encontrar la corteza continental. En los estados finales de esta diferenciación, un magma rico en volátiles ascendió a la superficie por las fallas que bordean las depresiones y formó los piroclásticos. Los fluidos metalíferos mineralizantes, que se separaron del líquido residual en la cámara magmática, debieron ascender a través de los mismos conductos que el magma y alcanzaron el fondo marino a través de fracturas formadas por la erupción explosiva.

La fuente principal de los elementos formadores de minerales en depósitos magmáticos, fue magma subcortical de localización profunda. Las fases minerales diferenciables se formaron en un amplio margen de condiciones de profundidad y presión, desde las muy altas (150 km de profundidad), que necesita la estabilidad del diamante a temperaturas de hasta 1.500° C, a las relativamente bajas estimadas para la formación de algunos depósitos de sulfuros de cobre y níquel (Norilsk, por ejemplo) a 1 km y 3.000° C.

La segregación en el magma por inmiscibilidad de dos fases líquidas (rocas básicas y sulfuros), es el medio de concentración más efectivo de elementos en una solución muy diluida, si luego, en el sistema polifásico que pueda formarse, esas fases pueden a su vez,

no solo coalescer tendiendo a formar masas mayores para reducir la energía interfase, sino disponerse por orden de densidades.

Según Vogt, los sulfuros metálicos son solubles en fases silicatadas a temperaturas superiores a 1.500° C. Por tanto, enfriando desde temperaturas más elevadas y antes de que empezase la cristalización (solidificación) pudo tener lugar la segregación del fundido en dos fases líquidas inmiscibles. Esta segregación supone haberse alcanzado en ese sistema heterogéneo concentraciones límite para los elementos de que se trate, de tal manera que su potencial químico sea, para cada uno, el mismo en todas las fases en equilibrio. El estudio de la intrusión *gabro* (roca básica profunda) de Skaergaard (Groenlandia) ha revelado que el contenido de azufre en el magma original era de 0,005 por 100, y que, cuando alcanzó el 0,01 por 100 y el % en Cu llegó al 0,02 por 100, se empezó a separar del magma silicatado un líquido rico en sulfuro de cobre. La composición global del magma influye también en este proceso; la presencia de Fe, por ejemplo, mejora la solubilidad de los sulfuros en la fase silicatada. Naturalmente la afinidad de S por los distintos metales es diferente, por eso, para formar sulfuros de cobre, se necesitan concentraciones de azufre relativamente pequeñas dada su conocida gran afinidad por el cobre.

Las condiciones de enfriamiento de la fase silicatada —dependientes, en cierto grado, de la profundidad de la intrusión— determinan la localización y el grado de concentración o de dispersión de la fase sulfurada. Las situaciones concretas podrían ser:

a) Los núcleos o gotículas de la fase sulfurada, cuando no tuvieron tiempo para sedimentar o coalescer, pueden ser atrapados en el cuerpo de la intrusión por la rápida solidificación de la fase silicatada. Se producen así depósitos con el mineral diseminado.

b) La fase sulfurada, fundida, puede acumularse, por su mayor densidad, en el fondo de la intrusión formando depósito de mineral, diseminado o compacto, si el enfriamiento fue suficientemente lento.

c) Si la masa intrusiva hubiera solidificado de forma bien diferenciada, algo del fundido de sulfuros, mientras estuviera en estado fluido, podría haber sido forzado tectónicamente a penetrar por fisuras de la fase silicatada —ya solidificada—, dando lugar a las vetas o venillas de sulfuro que se encuentran en el cuerpo de masas ígneas.

d) Por enfriamiento lento hubieran podido también formarse

masas dispersas relativamente importantes, en forma de macrocristales en el seno de la masa intrusiva.

e) Si la segregación se hubiese producido a mayores profundidades, ambas fases segregadas hubieran podido ser forzadas a fluir hacia la corteza, disponiéndose en capas diferentes.

f) Cuando la segregación se produjera como en el caso anterior, pero de forma más lenta, los fundidos se habrían podido inyectar sucesivamente, primero el silicatado y después el sulfurado. Este último (sulfurado) llegaría desde la parte más profunda cuando el primero (silicatado) ya hubiera solidificado. Así se formarían cuerpos mineralizados epigenéticos cuyo ejemplo más representativo es el de las menas de sulfuro magmático de Cu y Ni de Sudbury (Canadá) de origen profundo, subcortical. El fundido de sulfuros segregado del magma básico solidificó no solo después de la cristalización del magma, sino después, también, de los granitos más jóvenes que atraviesan las rocas básicas.

Para entender la estructura de la roca resultante, hay que contar siempre con la interacción de las fases, con su diferente densidad, con las posibles corrientes de convección, con movimientos irregulares de las fases diferenciadas en la cámara magmática, con tensiones tectónicas, con componentes gaseosos, etc., cuyo efecto puede quedar reflejado en aquella.

La composición mineral de las menas de sulfuros magmáticos es notablemente simple y uniforme en todo el mundo. Pero cuando en un mismo depósito se encuentran minerales diferentes y complejos (piritas complejas de Huelva), el hecho puede interpretarse como debido a la gradual evolución del fundido de sulfuros al enfriar, obedeciendo a lo previsto en los diagramas de equilibrio del correspondiente sistema (tabla VII y figs. 22-32).

LA TECTÓNICA DE PLACAS Y LA MINERALIZACIÓN

La más reciente manifestación del esfuerzo del hombre por entender la Tierra es la teoría de la tectónica de placas. Según ella la litosfera está dividida en inmensas placas —hasta doce de gran tamaño y varias más pequeñas— que se desplazan perezosamente como inmensas balsas sobre la roca más densa, más caliente y más fluida que se conoce como *astenosfera*. Centrándonos en su vertiente mineraloge-

TABLA VII

Composición química de las fases sulfuradas presentes en la mena de Sotiel (Huétolá)

Elementos %/e peso	Fe	Zn	Pb	Cu	Sb	As	Sn	Mn	Co	Ag
Minerales										
Pirita	44,7 - 45,5					< 0,6			< 0,08	
Blenda	9,5 - 11	55 - 56		< 0,5						
Galena	0,15 - 0,20	0,15 - 0,30	85,3 - 86	0,15 - 0,20		< 2,8		0,15 - 0,30 no siempre		
Calcopirita	32 - 34,5 *			32 - 33,5						
Bournolita	< 0,09	< 0,5	40,6 - 41	15 - 15,5 **	20 - 20,5	< 2,6				
Boulangerita			53,8	< 1,63	24,8	< 1,3		0,20 no siempre		
Arsenopirita	34 - 36				2,25	45,2 - 46				
Pirrotina	58,8 - 59,2					45,5				
Estanina	12,6 - 14	< 2,8		29,5 - 30		< 0,1			< 0,1	
Tetraedrita	***	***		36,8		< 2,1	22,5 - 23,1			***
Zinckenita	****	****	34,2	****	28,3	****				
					40,3					

* Fe presente en exceso de la composición estequiométrica.

** Cu presente en exceso de la composición estequiométrica.

*** Fe % + Zn % + Ag % = 10 % en solución sólida.

**** Entre 0,4 y 1,65 % en solución sólida.

nésica, en esta teoría se postula que las masas metálicas son una consecuencia de la intensa actividad fisico-química en los contactos entre esas placas, que pueden ser divergentes, frontales o paralelos. Cuando son divergentes —las placas se separan— el magma, fluido y caliente, acude desde el manto y forma nueva corteza; en los contactos frontales o colisiones, la corteza o se levanta formando montañas, o una placa se sumerge en la astenosfera y la otra se monta sobre ella; en los paralelos se produce un rozamiento entre bordes. A todos ellos se asocia la producción de depósitos de minerales metálicos. Por eso se buscan éstos, con razonable esperanza, en los antiguos contactos, ahora en seco.

Los depósitos se sitúan en centros de expansión, unos en el interior de la corteza, sobre el manto; otros, los llamados *hidro-depósitos*, en el propio fondo marino por lenta acumulación de elementos contenidos en el agua de mar, aportados por corrientes externas (ríos, arroyos, etc.).

Los metales Fe, Mn, y otros, son poco solubles en medio alcalino y oxigenado —como el agua de mar— y, por ello, tienden a precipitar como óxidos e hidróxidos insolubles en forma de pequeñísimas partículas sobre cualquier sólido del fondo. Otros metales se fijan por organismos vivos —planctónicos o bénticos— a partir del agua de mar. Cuando éstos mueren, los metales se liberan en la interfase agua-sedimento, incorporándose a éste.

Todos estos procesos son lentos. El tiempo de formación de *hidro-depósitos* se ha estimado por degradación radiactiva de sus elementos en menos de 1 mm cada mil años. Así se piensa que se formaron, por ejemplo, los llamados nódulos de Mn, bien desarrollados en depresiones oceánicas —llanuras abisales— que reciben una mínima aportación de materiales de la superficie.

Estos nódulos, advertidos hace un siglo, son sorprendentemente ligeros —aunque solo contienen metales—, porosos y deleznales. No se conoce aún cómo se forman, pero crecen alrededor de un pequeño núcleo que hace de semilla (un diente, un hueso, un trozo de roca). Tienen entre 12 y 150 mm de diámetro. La edad de uno de 45 kg de peso se estimó en dieciséis millones de años. Se dice que en el fondo oceánico hay suficiente cobre para abastecer al mundo entero durante seis mil años, mientras en tierra firme solo hay para cuarenta años; suficiente níquel para ciento cincuenta mil años, en tierra para cien años; aluminio para veinte mil años, en tierra para

cient. Pero todo esto es la esperanza abierta a un horizonte lejano y en medias luces, no sabríamos decir si de crepúsculo de amanecer o de ocaso. En otros sitios, la simultánea sedimentación detrítica conduce a la formación de depósitos menos concentrados.

La diferente composición de algunos depósitos en cuanto a la relación Fe/Mn, ha sugerido, para ciertos casos, una interpretación diagenésica en el propio sedimento. Según ella, la oxidación de la materia orgánica sedimentada reduce el potencial de oxígeno en el agua retenida, creando condiciones reductoras a cierto nivel bajo el fondo. Cuando las partículas que contienen Fe y Mn, gradualmente enterradas, alcanzasen ese nivel se redisuelven por reducción, concentrándose sus cationes en la solución que empapa el sedimento y emigrando, por difusión, hacia la zona oxidante, donde vuelven a precipitar de nuevo como partículas sólidas. El límite entre las zonas oxidante y reductora actúa como un filtro selectivo para ciertos metales que se concentrarán, según sus características químicas, a uno u otro lado.

En nuestra opinión, una cosa es que se puedan enunciar reacciones verosímiles con mayor o menor fundamento físico-químico, aunque sin base experimental directa —es decir, concebidas en condiciones imaginadas— y otra es que ese tipo de reacciones, con tan complejas y a veces innecesarias concomitancias, hayan sido realmente el origen de los actuales depósitos minerales de carácter metalífero, aunque procesos así puedan actualmente observarse en ciertos puntos del planeta.

Las zonas de expansión en la tectónica de placas, donde se va creando nueva litosfera, son zonas de intensa actividad sísmica y volcánica, situadas en el eje de una depresión oceánica. Pero ¿por qué la concentración metálica?

En los años sesenta, las investigaciones en fondos marinos revelaron notables anomalías geoquímicas (por ejemplo, concentraciones anormalmente elevadas de Fe y Mn). Ni la sedimentación detrítica, ni la precipitación química a partir del agua marina normal, explicaban el fenómeno. Tenía que haber una razón local, posiblemente relacionada con la actividad volcánica o hidrotermal en el eje del contacto entre placas.

El hecho notable, que parece comprobado, es que la velocidad de depósito de Fe, Mn y otros metales, es varias veces mayor a lo largo

de los centros de expansión que en cualquier otro lugar del fondo, lo cual sugiere que algo ocurre allí que conduce a ese resultado.

Depósitos metalíferos similares a los encontrados en las crestas oceánicas se han observado, en proceso de formación, en áreas volcánicas de aguas poco profundas. Se forman, según se han interpretado, por precipitación de compuestos metálicos a partir de soluciones calientes ricas en sílice y en metales, que descargan en el fondo marino en forma de manantiales hidrotermales. Cuando soluciones calientes de esta naturaleza se mezclan con agua de mar fría y oxigenada, metales como Fe y el Mn pueden oxidarse y depositarse en compuestos insolubles, y también la sílice cuya solubilidad en agua disminuye rápidamente con la temperatura.

Estos depósitos presentan diferencias importantes en cuanto a la relación Fe/Mn. La razón está en la mayor facilidad de oxidación del Fe, que es la que determina su preferente separación en compuestos insolubles frente al Mn. También difieren en la concentración de elementos traza, menor en los de origen hidrotermal por su mayor velocidad de depósito, ya que se supone que las trazas de aquellos elementos se fijan y son arrastradas por las partículas de los óxidos e hidróxidos de Fe y Mn y, cuanto más prolongado sea su contacto con el agua de mar —es decir, menor su velocidad de depósito— mayor será la oportunidad de esa fijación. Importa recordar que es precisamente la elevada concentración en estos metales traza (Co y Cu, en particular) la que les hace más atractivos desde el punto de vista económico.

Queda aún por aclarar, como siempre, de dónde proceden las soluciones calientes que constituyen esos manantiales hidrotermales y de dónde tomaron los metales que aportan. La explicación que hoy se propone es la siguiente: Contando con suficiente permeabilidad en la corteza oceánica reciente, se piensa que el agua de mar puede alcanzar, probablemente, varios kilómetros de profundidad bajo el nivel del fondo. Allí, en la zona caliente, donde el magma se está elevando por el eje del contacto, el agua se calienta y se desplaza hacia arriba por convección, descargando en el fondo marino en manantiales calientes.

La circulación descrita transcurre por rocas basálticas sobre las que actúa el agua de mar calentada. Cuando se experimenta en el laboratorio esta acción del agua de mar sobre muestras de basalto en polvo, se encuentra que, a temperaturas de varios cientos de °C,

presiones elevadas, y tiempos largos (hasta de años), el agua original —oxigenada y ligeramente alcalina— evoluciona a ácida y reductora, y se enriquece en SiO_2 , Ca, Fe, Mn, Cu y otros elementos extraídos de la roca basáltica. La composición de estas soluciones experimentales, se dice que es notablemente similar a la de las hidrotermales que descargan en el fondo oceánico. Así se pretende explicar el origen de los metales que se depositan asociados a las crestas oceánicas que son, o han sido, centros de expansión.

Puesto que los basaltos se originaron, según parece, en la fusión parcial del manto a 25-50 km de profundidad, los elementos lixiviados proceden de aquel manto.

Lo dicho podría resumirse así: El agua del mar penetra bajo el fondo en la vecindad de una zona activa de crecimiento litosférico. Circula por la zona recientemente formada —muy fracturada— de esta corteza, pudiendo alcanzar varios kilómetros de profundidad, calentándose a unos cientos de °C. Este agua caliente lixivia la costra basáltica por la que circula, e incorpora y transporta en solución algunos elementos, volviendo a elevarse por convección hasta el fondo oceánico donde descarga y se pone en contacto con el agua de mar fría. El Fe y el Mn se oxidan y, así oxidados, se separan parcialmente, depositándose junto con SiO_2 y elementos menores, capturando e incorporando al depósito a otros elementos (P, tierras raras, etcétera).

Para subrayar la importancia de esta circulación hidrotermal se ha estimado que, en aproximadamente cien millones de años, ha circulado de esta manera un volumen de agua equivalente al total de los actuales océanos. De aquí puede deducirse la importancia que habría que atribuir a estos sistemas hidrotermales en la química del mar y en la interacción entre las fases sólida y líquida en la Tierra.

Como dato interesante hagamos constar que se estima que la corteza oceánica se desplaza del eje de crecimiento a una velocidad de, a lo sumo, unos pocos centímetros por año.

Cuando la nueva corteza alcanza el margen de la depresión oceánica, experimenta los complejos procesos geológicos de subducción y colisión, en los cuales, fragmentos de la litosfera oceánica pueden ser levantados hasta situarse en la superficie en los márgenes de los continentes. Estos fragmentos se conocen como *ofiolitas* (rocas eruptivas submarinas básicas o ultrabásicas) y se han localizado en varias partes del mundo, reconociéndose en ellas depósitos metálicos análogo-

gos a los descubiertos en la litosfera oceánica moderna. La estratigrafía es, se dice, la misma que se ha encontrado asociada a los depósitos metálicos de los actuales océanos en perforaciones recientes, y su geoquímica también idéntica a la de los depósitos de los modernos centros de expansión oceánicos.

El estudio de las ofiolitas no sólo confirma, según algunos investigadores, la validez del modelo mineralogénico hidrotermal, sino que sugiere que, en los centros oceánicos de expansión, se forman otras clases de depósitos de minerales metálicos. Se pretende, por ejemplo, que la identificación de ofiolitas como fragmentos de la antigua litosfera oceánica, y el descubrimiento de que zonas de crecimiento, por depósito, de la moderna litosfera oceánica son localizaciones de grandes sistemas hidrotermales, han arrojado luz sobre el origen de los depósitos de sulfuros metálicos ofiolíticos. Y la luz es la siguiente sucesión de hechos imaginados: El agua de mar circulante bajo el fondo oceánico se hace fuertemente reductora, e incorpora metales en solución, y también azufre en forma de S^{2-} , por lixiviación de la roca (es de suponer que de sulfuros en ella contenidos) o por reducción de sulfatos en solución en el agua de mar; en estas condiciones, se favorece la combinación de azufre con ciertos metales (principalmente Fe, Cu, Pb, Zn) que, en forma de sulfuros insolubles, se separan de las soluciones hidrotermales.

Todo ello se presenta como evidencia de que los depósitos de sulfuros metálicos similares a los encontrados en las ofiolitas complejas, pudieron haberse formado en centros de expansión dentro de la corteza oceánica basáltica por los mismos sistemas hidrotermales que dan lugar a los depósitos sedimentarios que allí se han encontrado.

La temperatura de las soluciones hidrotermales; la profundidad y la velocidad a que circula el agua de mar penetrando en la litosfera submarina; la concentración que alcanza en iones metálicos y en S^{2-} ; la insolubilidad relativa de los posibles compuestos, etc., determinarían el alcance, localización y naturaleza de los depósitos de sulfuros metálicos. Se piensa que la separación de ciertos metales de la solución —por precipitación de sus sulfuros antes de que la solución descargue en el mar— es la causa del fraccionamiento de su contenido en metales. Por ejemplo, se dice, el Mn no forma fácilmente su sulfuro; se conserva, pues, en solución hasta que el caudal hidrotermal descarga en el fondo del mar. El Fe, sin embargo, se deposita parcialmente dentro de la corteza como sulfuro de hierro. Con este

curioso fraccionamiento se pretende explicar por qué algunos depósitos sedimentarios hidrotermales son ricos en Mn no conteniendo apenas Fe.

Se han recogido basaltos del fondo oceánico alterados hidrotermalmente, mineralizados por vetas y formas diseminadas de calcopirita (CuFeS_2), pirita (FeS_2) y otros sulfuros. Estas mineralizaciones están asociadas, en las ofiolitas complejas, a depósitos masivos de sulfuros metálicos. Para sustanciar esta analogía, falta encontrar, por perforación de la corteza oceánica, depósitos masivos de sulfuros metálicos; tarde o temprano —se dice— aparecerán. Así sea. Pero, aunque así fuere, ¿se podría, por ello, dar por resuelto el tema con tan elaborada, inverosímil e insuficiente teoría hidrotermal y descartada la magmática directa, que no necesita de intermediarios fluidos acuosos?

Las ofiolitas complejas, por lo visto, no agotan con esto su capacidad de ilustración. Para algunos informan también sobre la formación de depósitos de compuestos metálicos a profundidades no alcanzadas por las soluciones hidrotermales, en puntos situados en la corteza profunda o en el manto; por ejemplo, de cromita (Cr_2O_3), conteniendo cantidades notables de Ni y Pb, localizados en rocas ultramáficas (minerales petrogénicos) que pertenecieron al manto suboceánico superior. Su formación se sitúa a 10 km por debajo del fondo marino, por segregación a partir de bolsadas de magma dispersas en el manto superior a lo largo de los contactos entre placas; la fusión se produciría al reducirse la presión durante la elevación del material del manto bajo el eje de la expansión. A pesar de todo, se reconoce la escasa probabilidad de que en un próximo futuro alguien tenga la suficiente buena fortuna de encontrar en el océano depósitos de cromita del tipo de los aflorados en las ofiolitas de Chipre y de Luzón.

COMENTARIOS A LA ACCIÓN MINERALIZANTE DENTRO DE LA TECTÓNICA DE PLACAS

Si los actuales depósitos minerales conocidos se formaron como consecuencia de una tectónica de placas como la expuesta, habría que aceptar que el proceso se extendería hacia atrás en los tiempos geológicos; es decir, que hubo placas, que hubo mares y que hubo

un medio como éste en el que ahora se encaja la teoría. Si así fuera, tomando como base la ubicación de los yacimientos, se podría reconstruir, regresando en el tiempo, la tectónica del planeta y, con ello, fijar con bastante aproximación no sólo dónde y por qué se deben localizar los yacimientos aun ocultos, sino también los casos singulares, los puntos fuera de la gráfica, las realidades al margen de toda predicción, como Almadén. ¿Sería esto compatible con la evolución natural del planeta, que, por su misma naturaleza, va modificando sus propias condiciones?

No parece que se deba llegar, necesariamente, a la conclusión de que el mecanismo descrito, el que actualmente opera —en el supuesto de que se acepte con el carácter casi universal con que se propone— sea el que operó en el pasado para producir depósitos como los que actualmente se explotan.

Suponiendo que este proceso continúe, la historia de la Tierra permitirá algún día —la tectónica por venir— que los depósitos actualmente en formación sean depósitos análogos o comparables a los conocidos que vivieron la misma génesis. ¿Hay establecido algo suficientemente sólido, con suficiente rigor científico, que permita pensar que se está repitiendo el ciclo imaginado?

La diferencia del proceso que se acaba de resumir, al menos en cierta modalidad del mismo, con la teoría hidrotermal convencional, es que en aquél las soluciones hidrotermales descargan en un océano donde el efecto de enfriamiento domina sobre el de dilución produciendo la precipitación en un medio cuya capacidad disolvente solo está reducida por el cambio de temperatura. Pero si la masa de solución hidrotermal enfría es porque se mezcla —se diluye— en su propio disolvente (agua de mar), y queda por demostrar que el efecto precipitante del enfriamiento, domina sobre el disolvente de la dilución.

No se trata de discutir —aunque se crea discutible— que por el proceso propuesto se estén depositando lodos ricos en ciertos metales (Fe y Mn principalmente), ni que en estos lodos se concentren algunos elementos traza; se trata de que, por ese mecanismo, no puede explicarse la formación de menas (mineral + ganga) como la que forma el yacimiento de blenda acaramelada en el corazón de Peña Santa, o el de cinabrio de Almadén, o las de piritas complejas de la provincia de Huelva.

No está, ni mucho menos, clara esa circulación de aguas por un circuito que quiere ser bastante semejante al que se establece en un

sistema de calefacción convencional. La diferencia básica está en que en éste, el circuito está perfectamente fijado por construcción calculada para su efecto. Pero es que, además, en la misma medida en que la semejanza se aproximase a la identidad, perdería eficacia disolvente sobre la roca al ser obligado a circular por espacios (cavidades, grietas, etc...) ya vaciados, donde la acción disolvente se localizaría en las paredes.

La disposición de los sulfuros en la roca basáltica que se ha comentado, creemos que es buena prueba de que en la solidificación del basalto quedaron ocluidas fases sulfuradas, segregadas en el magma, bien diferenciadas, en masas más o menos grandes. El grado de dispersión dependería de la naturaleza de las fases y de la oportunidad de que, por las condiciones de temperatura, viscosidad, tiempo, presión, composición o desplazamiento, pudieran haber crecido.

La circulación hidrotermal —si existiera— utilizaría circuitos fáciles, con preferencia a percolar a través de toda la masa de roca, lo cual reduciría la posibilidad de incorporar solutos, posibilidad ya de por sí reducida dada la pequeña solubilidad de la roca basáltica en agua. Por ello, imaginar un mecanismo por el cual azufre y metales en compuestos dispersos en el basalto, evolucionen, por disolución y reprecipitación, a masas concentradas en los compuestos ocluidos en la propia masa basáltica, no parece tan evidente como se pretende.

Se afirma, sin más precisión, que durante la circulación del agua de mar por esos dantescos itinerarios bajo el fondo oceánico, las aguas se hacen fuertemente reductoras. ¿Quién se oxida? ¿A quién reduce?

Admitida la circulación con disolución, se formarían nuevas cavidades en la roca ampliándose, además, las primitivas. Entonces habrá que explicar por qué el depósito de sulfuros se localizó en ciertos lentejones que no rellenan cavidades, ni fueron vía de soluciones en su desplazamiento, sino que forma cuerpo con la roca basáltica; y también la compacidad de los sulfuros formados, los macrocristales de única especie mineral, y los cristalitos integrados de diferentes especies (piritas complejas).

EL YACIMIENTO DE ALMADÉN

Así estaban las cosas —más o menos como ahora— cuando hace diez años (1968) al plantearnos una alternativa al actual tratamiento de los minerales de Hg para su beneficio, desembocábamos en el estudio de las menas españolas de este españolísimo metal, trabajo que inicié con la de Almadén y la inestimable colaboración del Dr. Guilemany con la que, afortunadamente, sigo contando.

Estamos ante un yacimiento situado en una de las más privilegiadas regiones del mundo —desde el punto de vista minero— por su riqueza en Cu, Pb y Hg. Allí se sitúan, según Laffite y Ronverral (1963), el 1,75 por 100 de las reservas mundiales de Pb-Zn-Ag, el 1,25 de las de Cu y el 50-60 por 100 del Hg (estas cifras pueden estar modificadas por el reciente alumbramiento de yacimientos de Hg en Argel y en la URSS; y por las reservas aún no aclaradas de los fondos oceánicos). Lo excepcional no es sólo la localización y la notable concentración de esas mineralizaciones, sino que aparezcan en una región —el suroeste peninsular— cuya constitución no hubiera hecho suponer esta riqueza.

ASPECTOS GEOLÓGICOS

La geología de la región de Almadén, así como la naturaleza de su famosa roca *fraillesca*, habían sido estudiadas, profunda y ampliamente, por el ilustre Ingeniero y Académico de esta Corporación D. Antonio Almela y sus colaboradores. Más recientemente, Saupé hace su tesis doctoral en Ciencias Naturales por la Universidad de Nancy, sobre la geología del yacimiento de mercurio de Almadén. Se trata de un trabajo inteligente, honesto, directo, concienzudo y meticuloso, realizado por un francés culto a quien, como español, deseo dejar aquí testimonio de mi agradecimiento; y lo hago de esta forma particularmente expresiva y sentida, precisamente porque estamos en tan cordial como total desacuerdo sobre su modelo genético del yacimiento.

Las que pudiéramos llamar circunstancias geológicas del yacimiento no fueron objeto de nuestro estudio, por razones obvias —no somos geólogos— pero sí de nuestra consideración por la luz que

pudieran arrojar para poder discurrir sobre la génesis del mismo. He aquí un resumen comentado de los aspectos que más nos interesan.

La cuarcita del llamado *criadero* —reminiscencia de las ideas de Alons Barba, es de suponer— se interpreta como el resultado de una sedimentación sobre el fondo irregular y poco profundo de un mar epicontinental muy agitado. La agitación constante eliminaría los finos; las depresiones del fondo se llenaron de arena limpia y en las zonas altas se concentraría la arcilla. Los movimientos tectónicos que provocaron la intensa acción erosiva que condujo al sedimento, pudieron ser manifestaciones de un volcanismo básico muy profundo, localizado en Almadén, al que se alude con frecuencia en los estudios del tema, ya que en la historia geológica del lugar parecen influirse mutuamente la sedimentación, la actividad ígnea y los procesos tectónicos.

Las masas mineralizadas de Almadén tienen forma lenticular —de 3 a 5 m de potencia— en una extensión de, aproximadamente, 300 m, y a una profundidad de 380 m. Las tres masas principales se disponen superpuestas, circunstancia que se repite en los cuerpos mineralizados de otras minas. Su forma exacta no ha podido establecerse por falta de documentos. Se han encontrado otros lentejones mucho más reducidos (decamétricos), y pobres. La mineralización no se limitó a los tres lentejones explotados.

Todas estas masas mineralizadas —principales o de menor importancia— se suponen incomunicadas y, basándose en esta incomunicación —más que inexistente, no encontrada, o no buscada— se rechaza, «a priori», una impregnación epigenética.

Todo esto suponiendo que los lentejones ahora aislados, independientes, no sean partes de un mismo cuerpo ulteriormente dislocado.

Aunque no podemos aportar observaciones personales más que en relación con la microestructura de la roca, podemos opinar, sin salirnos de un válido entendimiento, que las masas mineralizadas pudieran haber constituido volúmenes del sedimento de menor compacidad —mayor porosidad y permeabilidad— por diferentes granulometría de los detritus, o un más prolongado contacto con la solución o medio acuoso. Así pudo formarse esa especie de esponja mineral de granos de cuarzo, muy adecuada para una impregnación. No así el resto de la cuarcita particularmente compacta y estéril. Creemos que esta heterogeneidad estructural en el sedimento es explicable por un proceso diagenético. Ante este hecho, el fluido mi-

neralizante fue selectivo a la hora de la impregnación, que realizó en los volúmenes de roca idóneos.

La descripción más breve y precisa de la mena de Almadén la hizo hace cien años D. Luis de la Escosura quien, refiriéndose a la roca cuarcítica, dice: ... *en la que el cinabrio ha penetrado difundiéndose por toda la masa como el agua penetra en una roca porosa cuando se sumerge en este líquido*. Descripción que, por otra parte, tiene sus antecedentes en la que hace cuatro siglos hiciera Amador Cabrera del yacimiento de Guancavélica: ... *una roca durísima empapada toda de azogue*.

Sin embargo, a los investigadores más modernos se les había escapado el idiomorfismo de los cristales de cuarzo que forman la roca. Sauté dice que el cinabrio se sitúa entre los granos de cuarzo *siempre xenomórficos*, y que se dispone como comprimido por ellos durante el crecimiento diagenético. Este es precisamente uno de los puntos en que estamos en radical desacuerdo. Para nosotros el idiomorfismo del cuarzo es *evidente*, y demostrable, en *todas* las muestras observadas.

Todas las cavidades mineralizadas estudiadas en múltiples muestras estaban erizadas de cristallitos idiomórficos de cuarzo. No eran *pirámides vecinas en superficies de fractura que erróneamente se pudieron tomar como prueba de idiomorfismo*, sino verdaderos cristallitos idiomórficos de cuarzo, que aún están allí para quien quiera observarles; y este mismo hecho se pone de manifiesto, como no podía menos de ocurrir, en láminas delgadas cuando se observan con suficiente atención y con la técnica adecuada. Los granos de cuarzo no son xenomorfos más que en aquellos puntos que, por la compacidad inicial con que se depositaron, no estuvieron en situación de experimentar y poner de manifiesto la recristalización diagenética (figs. 2, 4, 5, 7, 8, 9 y 10).

Según parece, el volcanismo precedió por poco tiempo al depósito de los dos niveles de cuarcita mineralizados. Rocas volcánicas enmarcan a las cuarcitas, y en el interior de las inferiores se han observado formas lenticulares de origen volcánico.

En la roca fraileasca —que es, en su conjunto, piroclástica, impermeable, compacta, cementada y estéril— se han encontrado, a veces, pequeñas inclusiones de HgS que no parecen relacionadas con fisuras. La misma roca, en otros niveles (San Teodoro), está cruzada por un entramado de fracturas cementadas por cinabrio.

Las lavas silúricas que se situaron estratigráficamente sobre las cuarcitas, contienen numerosas manchas de cinabrio.

La forma de la masa de la roca frailesca es un tema abierto a debate, y en este debate Quintero defiende la idea de una chimenea volcánica, idea que extendió a las otras masas. Estas chimeneas volcánicas habrían producido grandes fallas que servirían de canales o vías de ascenso a los fluidos epi y teletermales. Quintero propugna hasta seis de estas chimeneas. El Dr. Saupé admite una (Arroyo del Colmenar) que, por cierto, no está mineralizada con mercurio, pero sí con Pb. Tampoco lo están las fallas.

Se anota que, en muchos casos, los filones están rodeados por un borde blanco de algunos centímetros donde no hay cinabrio, y que el estudio microscópico de este borde descubre una sorprendente analogía con los residuos de los hornos de destilación.

Es ostensible, y a veces abundante, la presencia de Hg metal en la mena de Almadén (*), que rezuma en algunas paredes de la mina, lo cual revela una cierta movilidad del metal dentro de la roca. Incomprendiblemente, Saupé dice que precisamente esa movilidad descarta cualquier razonamiento termodinámico basado en el equilibrio Hg-SgS; otro punto en desacuerdo pues, en nuestra opinión, más bien habría que decir que es precisamente la presencia de Hg la que da existencia real a ese sistema, y que, por lo tanto, inevitablemente, hay que razonar sobre él (figs. 1, 3, 6, 13 y 14).

En éste siempre admirable y sorprendente mundo mineral, los hombres que en él trabajan y sus hipótesis, son, a veces, no menos sorprendentes y admirables. Por ejemplo, a este mercurio elemental pocos autores le atribuyen un origen *primario*, y se habla de que ese Hg podría haber escapado de soluciones hidrotermales y precipitar en los lugares favorables, pero se sigue sin decir cómo estaba en esas soluciones y de dónde procedía; tratándose del sutil mercurio el cómo puede escapar es siempre comprensible. Nosotros opinamos que ante una asociación natural tan evidente de un metal en estado elemental y su sulfuro, estamos obligados a una explicación coherente para la aparición de *ambos* y para que puedan y deban hacerlo *juntos*.

El mercurio nativo no es congruente con ninguna de las hipótesis

(*) Calderón Arana se refiere a una ocasión (1910) en que en Almadenejos se tropezaron con una bolsada de 170 litros. Se cita también que en 1860 aparecieron varias cavidades cuyo contenido total llegó a 1 m³.

que propugnan la formación del mineral por precipitación del HgS a partir de una solución; por eso se busca la explicación de su existencia atribuyéndole un origen secundario, y se acude al hecho fácilmente observable de la exudación de la roca para argumentar en favor de su origen reciente, *al menos de parte de él* (!).

No alcanzamos a entender qué relación puede haber entre el fenómeno de la exudación de mercurio por la roca y su naturaleza primaria o secundaria según de qué parte de él se trate. Ni entendemos cómo se puede pensar en un origen diferente para un mismo mercurio, indiferenciable, y alojado en una misma roca *mineralizada por su propio sulfuro*.

Es verdad que en Caunedo (Asturias) no aparece Hg elemental, y es verdad que tampoco hay lo que, de forma ambigua, se titula «materia orgánica» y se registra en Almadén, pero con sólo estos hechos no parece prudente establecer una relación causal entre «materia orgánica» y Hg metálico. Faltan, por lo menos, las posibles reacciones por las que se llegó a ello, y el mecanismo por el que se acumuló en tan grandes masas.

En cuanto al mineral en sí, al cinabrio (HgS), que hemos observado y estudiado detenidamente, nos ha mostrado, en rotura, una estructura fibroso-laminar, incluso en la forma granular y microcristalina, pero sin ninguna *aparición sedimentaria o estratificada*, ni con *marcas de presión*, como no sean las huellas de los cristales de cuarzo que estuvieron en contacto con él. Sin embargo, como este cinabrio mineraliza una roca sedimentaria, la mineralización puede poner de manifiesto las características intrínsecas de la roca alojándose en espacios intercristalinos que revelan, por su disposición, la naturaleza sedimentaria de la cuarcita, *no del cinabrio* (figs. 9, 10, 11 y 12).

Almela y colaboradores (1962) ya habían encontrado una relación estratigráfica de la mineralización mercurífera de interés económico con un horizonte portador único, que es la cuarcita del criadero; pero, como es natural, no habían deducido de ello consecuencias genéticas.

Como químicos nos es particularmente sorprendente la referencia que hace el Dr. Saupé a *granos de cuarzo fuertemente corroídos por el cinabrio*. Un hecho así, que supondría tener que revisar principios básicos de la química mineral, no hay sólo que enunciarle, hay que experimentarle; y luego formularle. Por nuestra parte, lo observado

en los ensayos de síntesis es que, como era de esperar, no hay interacción química entre el HgS fundido y los cristallitos de cuarzo. Es posible que lo observado y atribuido a una corrosión químicamente inexplicable sea, en realidad, la imagen de cristales de cuarzo sorprendidos por la mineralización en proceso de formación, no de disgregación por «corrosión». Con esto queda también descartado, por nuestra parte, otro fenómeno que habría que relacionar con éste, que es la llamada *sustitución* (figs. 10 y 16).

Como ya se ha dicho, la paragénesis es muy simple; pero debe contarse con las otras fases presentes, aunque muy minoritarias (pirita, calcopirita, galena, blenda), no sólo al explicar el carácter prácticamente monomineral de los yacimientos de cinabrio, sino para justificar la presencia de otras fases —por muy minoritarias que sean— y ello de la forma más coherente y simple posible.

Otro hecho notable en la concesión de Almadén es que, en su término, se encuentran otras dos mineralizaciones de paragénesis simple (monominerales) y morfológicamente diferentes. Así como la de mercurio impregna cuarcitas, la de antimonio cementa pequeñas fracturas, y la de plomo se presenta ya en filones. La interpretación que se dé tiene que comprender a todas estas mineralizaciones porque, en un entorno tan pequeño y de tan singular concentración mineral, no cabe pensar en orígenes diferentes, no coordinados, teniendo en cuenta la identidad volcano-sedimentaria del entorno. Es preciso aceptar que para estas mineralizaciones de la misma naturaleza (sulfurada) y paragenésicamente simples, no debe pensarse en orígenes diferentes, no coordinados, no relacionados. No es suficiente hablar de diferentes *épocas* y condiciones físico-químicas de llegada. En lo que sí cabe pensarse es en qué características propias tiene cada mineral para que haya elegido una u otra ubicación. Para nosotros el hecho parece revelar, primero, una diferenciación primaria de los fluidos, ya que dieron lugar a minerales casi puros y, segundo, una distinta capacidad de impregnación, distinta fluidez. Si esto fuese así la mineralización de la cuarcita requeriría, evidentemente, mucha más fluidez en el que, por ahora, llamaremos fluido portador del cinabrio, que en el de la galena filoniana.

Lo expuesto —como hemos dicho— es un resumen de los hechos geológicos más importantes, registrados o imaginados, de los que hemos podido encontrar referencia. Este puede ser el momento de

reseñar las sucesivas interpretaciones del fenómeno de la mineralización de Almadén.

HIPÓTESIS Y TEORÍAS GENÉSICAS

Todas las teorías clásicas admiten la impregnación de una cuarcita preexistente. Se diferencian en los procesos que para ello postulan, que pueden resumirse así:

S u b l i m a c i ó n

Dadas las esenciales peculiaridades del elemento mercurio —químicamente noble, líquido y volátil— no puede extrañar que en ellas se hayan inspirado teorías de génesis que justificarían también su simple paragénesis.

Ezquerria del Bayo (1838) ya opina que el cinabrio se había producido por la combinación de exhalaciones de S y Hg. El Hg elemental encontrado en la mina era, naturalmente, el que por defecto de S, o por falta de oportunidad, no se hubiera combinado. Acaso este autor se inspirase en lo ya descrito hace mil años por Jabir y por Rhazes, experimentado por San Alberto en el siglo XIII, e industrializado en el XVI.

Pero una cosa es la posibilidad de esta combinación de los elementos en fase vapor y otra que en un punto del planeta coincidan las dos «exhalaciones» en proporciones aunque sólo sean aproximadamente estequiométricas, pasando por alto el problema de su origen —dónde y porqué se forman— y sin justificar su sorprendente coincidencia; amén de su posible, o imposible, «casamiento» con los aspectos morfológicos y estructurales de la mena real.

Impregnación hidrotermal epigenética

Es el modelo más ampliamente aceptado, aunque con numerosas variantes. Inicialmente le propuso Casiano de Prado (1855) para quien el yacimiento de Almadén estaba formado por capas impregnadas de cinabrio (no filones), rechazando la teoría sedimentaria tan extendida y aceptada en el siglo XVIII; teoría que, con argumentos actualiza-

dos, vuelve a proponer el Dr. Saupé. De Prado cree también en la sustitución, al menos parcial, del cuarzo por el cinabrio, y destaca el papel que, en su opinión, debió jugar la materia orgánica para la presencia de Hg elemental, tratando, incluso, de cuantificar esta dependencia.

Becker (1888) sostuvo la contemporaneidad del cuarzo y del cinabrio pero negaba la sustitución. Sus trabajos dieron lugar a una viva controversia recogida en las «Actas de la Sociedad Española de Historia Natural» (1894) en la que participaron Calderón Arana, Cortázar y Fernández Navarro.

La mayor parte de los autores que se apuntan a la impregnación hidrotermal admiten que el transporte del mercurio se hizo en forma de polisulfuros o sulfomercuriatos, ya que la solubilidad del HgS en las soluciones de Na_2S y NaOH muy concentradas llega a ser, a 25°C , de un mol de HgS por mol de Na_2S , relación que permite pensar en la formación del complejo S_2Hg^- . Naturalmente la dilución de esta solución (reducción de la concentración de Na_2S o de NaOH) provocarían la precipitación de HgS. La temperatura de depósito se estima entre 100 y 200°C y la presión menor de 30 bars.

Sin embargo, ni en las menas, ni en los manantiales calientes en los que actualmente se depositan trazas de cinabrio, ni en los fluidos ocluidos en el mineral extraído, se han encontrado hechos que pudieran apoyar esta forma de disolución y de transporte. En cualquier caso, es el transporte hacia atrás —recorrer el camino al verdadero origen— el que deberíamos seguir, preguntándonos: ¿De dónde el H^{++} ? ¿De dónde el Na_2S ? ¿De dónde el NaOH? ¿Por qué la coincidencia? ¿Cómo la continuidad? ¿Dónde están los subproductos?

Krauskopf (1951) ha resumido las condiciones físico-químicas en que puede producirse la disolución, transporte y precipitación del mercurio para llegar a una acumulación hoy económicamente explotable. Figuran en ellas no sólo las ya citadas, de formación de iones complejos, de transporte en fase vapor, de formación de soluciones sobresaturadas o dispersiones coloidales, sino la posible reacción de HgCl_2 en fase vapor con H_2S anhidro. Pero las soluciones —tanto su formación, como su transporte y la precipitación subsiguiente del mineral— exigen un «aparato» físico-químico-energético y un circuito tan elaborados que apenas caben incluso en el casi ilimitado mun-

do de los posibles geológicos, porque se desvanecen hasta desaparecer, en lo improbable.

Como puede apreciarse, toda la química del Hg ha sido, una y otra vez, traída a cuento para tratar de explicar la acumulación local de un compuesto tan singular como el HgS y en estado tan puro; «impurificado», en todo caso, con el propio Hg.

No vamos a discutir los hechos experimentales de laboratorio, sino la posibilidad de que esos hechos se hayan dado en la naturaleza con la continuidad necesaria, en un lugar concreto, y entre los disolvente y reactivos idóneos. El fenómeno hay que relacionarle con sus antecedentes, caminando —insisto— hacia atrás en el tiempo y en el orden de las cosas, de los hechos. Lo que queda por aclarar es, nada menos, que de dónde y cómo se tomaron los elementos o compuestos que en solución iónica, molecular o coloidal, llegaron al lugar del yacimiento y por qué caminos y razones. Para extraer, por disolución, el Hg contenido en una roca no basta con postular el mecanismo, hay que aportar los medios; y el medio aquí, el reactivo en cantidad bastante, tendría que actuar selectiva e ininterrumpidamente sobre *toda* la masa; y, una vez disuelto el Hg, transportarle a otro determinado punto *concentrado*, ocupando un volumen miles de veces más pequeño.

Una cosa es que un proceso físico-químico sea posible e incluso, actualmente observable en la naturaleza— y otra que sea significativo para explicar formaciones que nunca son iguales, vagamente comparables, casi siempre distintas en el espacio y en el tiempo, másicamente desproporcionadas, y oscuramente interpretables.

Termosifónico

Esta teoría, comunicada por Fábrega en el Congreso Geológico Internacional de 1926, propone un gigantesco movimiento de convección de agua de mar con un bajo contenido en Hg, que fue depositándole en las cuarcitas a través de las cuales filtró. No hay ningún hecho ni paleográfico, ni tectónico, que apoye este modelo. Como único comentario anotaremos que el máximo contenido de mercurio en agua de mar que se ha registrado es de 1 ppb. Deduzcan ustedes mismos el volumen a percolar si encuentran la forma y la razón de la separación del Hg.

Chimeneas volcánicas

El Académico Prof. Almela (1960) y el Prof. Febrel, han hecho notar en Almadén la coincidencia de la mineralización con los *tufs* (tobas volcánicas) de mayor espesor, pero no relacionaron el hecho descubierto con la génesis del yacimiento. Para estos autores, la mineralización cinábrica fue muy posterior a la formación de los *tufs*, pero admiten, sin embargo, que los sulfuros pudieron introducirse a través de la roca fraileasca gracias a su macro o micro permeabilidad (por fallas o por porosidad).

Quintero (1970) postula la existencia de chimeneas volcánicas, que guiaron la aparición de grandes cizallamientos que servirían de conducto de ascenso a las soluciones hidrotermales mineralizantes procedentes de un batolito profundo.

Las ideas de Almela y Febrel estableciendo una relación, aunque solo sea de posición, entre cuarcitas mineralizadas y *tufs*, y las de Quintero relacionando la mineralización con un batolito profundo, permiten apoyar, como veremos, nuestra propuesta de impregnación.

Además, el hecho de que actualmente, en sulfataras activas como la del volcán Mendelejev (Curiles), se deposite cinabrio, o de que exhalaciones situadas en los alrededores de volcanes pliocénicos como las de Toscana (Italia) —no lejos del importante yacimiento de Mote Amiata— expelan 34 mg de Hg por m³, conduce a una evidente asociación volcanismo-mineralización en forma aún por determinar, pero no a postular que los yacimientos de cinabrio se formaran por este mecanismo de depósito.

Sedimentario

En esta interpretación del yacimiento de Almadén las ideas de Saupé no sólo son las más recientes, sino las mejor «arropadas» por el profundo estudio geológico realizado por su autor. Para él Almadén es el yacimiento *tipo* de los de mercurio en rocas sedimentarias, *especialmente relacionado con un volcanismo submarino*. Dada la singularísima riqueza de este yacimiento, opina que es imposible de explicar por una concentración única, y propone una eventual *preconcentración sedimentaria*. Declara que lo más importante de su interpretación del yacimiento es hipotético porque, a pesar de su per-

sonal y profundo estudio, le faltan datos: el método de explotación exhaustivo seguido en Almadén —o, mejor, la falta de él— ha hecho desaparecer detalles del yacimiento que hubieran sido muy importantes para su mejor conocimiento.

Para el Dr. Saupé el punto mejor dilucidado por su trabajo es la presencia antediagenética del cinabrio entre los granos de la cuarcita. Las *figuras de sedimentación* que dice haber observado, le confirman en su idea. También opina que el volcanismo fue posterior a la mineralización, y no hizo más que aportar la energía necesaria para el vasto movimiento de convección de los fluidos implicados.

Sobre las etapas anteriores sólo caben hipótesis, y en el terreno de las hipótesis propone esa preconcentración del mercurio en los estratos de materia orgánica ya admitidos, o en una heterogeneidad magmática con un *clarke* más elevado en las rocas básicas, lo que, a su entender, está corroborado por la existencia en ellas de granos aislados de cinabrio en concentraciones no económicas.

Para Saupé, las condiciones que se dieron en Almadén y que favorecieron la excepcional concentración de mercurio que allí se produjo, fueron los siguientes:

1. *Preconcentración* en unos sedimentos particularmente ricos.
2. Formación de *cúpulas térmicas* que precedieron a las erupciones submarinas.
3. Establecimiento de *circuitos convectivos* de fluidos —convergentes hacia esas cúpulas— que transportaron el mercurio y le liberaron en forma de exhalaciones (?).
4. Continuidad de estas condiciones favorables gracias a la *estabilidad del medio cratónico*.
5. *Precipitación* en un medio poroso o en una interfase geoquímica que produce la fijación del mercurio en forma de sulfuro insoluble.
6. *Captura y sellado* por la cobertura arcillosa y por el cimentado.
7. *Metamorfismo regional muy débil* que ha respetado el cinabrio así formado.

Expone su modelo genésico por fases porque la información de que se dispone, y la probabilidad de que todo sucediera como se dice, es distinta en cada una de ellas. Las fases que sucesivamente discuten son: a) llegada de la mineralización; b) origen del material o de los productos; c) mecanismo de llegada; d) evolución ulterior de la mineralización.

Por ser un trabajo muy reciente, especialmente avalado como tesis doctoral, creo oportuno comentarle siguiendo las fases genéticas que propone.

1. Llegada del material

Las *estructuras sedimentarias* que dice haber observado en el cinabrio, así como las inclusiones de este mineral entre núcleo y aureolas diagenéticas del cuarzo y en los granos recristalizados, no dejan duda a Saupé sobre la formación singenética del conjunto. Las *estructuras sedimentarias* pudieron formarse también —dice— por reemplazamiento de la roca banal preexistente por cinabrio, pero, a falta de argumentos en favor de esa sustitución, le parece más simple admitir que las estructuras citadas son primarias.

Las masas de cinabrio son masas cristalinas y, por ello, ni hemos visto ni podemos imaginarnos lo que describe como *estructuras sedimentarias*. Lo que sí revela el cinabrio que «sella» la porosidad de la cuarcita, es la estructura sedimentaria de esta roca; que es otra cosa.

Conviene distinguir entre *sedimentación* y *precipitación*. El cuarzo *sedimentó* en pequeños detritus, el cinabrio en todo caso *precipitaría* en forma muy fina. Si, como se ha dicho, el sedimento de granos de cuarzo fue intensamente lavado, no está claro cómo la agitación no arrastró al supuesto precipitado de HgS-mineral que, por cierto, acusa en la práctica fácil flotabilidad. Además, ¿cómo ese fino precipitado se consolidó en cristales grandes y a veces únicos? Porque para separarse de una solución en las masas cristalinas —mayores o menores— en que se presenta, hubiera necesitado un tiempo y un reposo que todo parece indicar que no tuvo: el tiempo, porque si la sedimentación de los detritus se hubiera dilatado tanto, las arenas no serían tan limpias, estarían mezcladas con arcillas; y el reposo no es precisamente una forma de lavar un sedimento.

Por otra parte, si el análisis de una muestra rica dio un 80 por 100 de cuarzo y un 16 por 100 de cinabrio, la formación singenética exigiría que, por cada cinco gramos de cuarzo, se depositase uno de cinabrio. Teniendo en cuenta las características de ambos minerales, y que el SiO_2 sedimenta *ya hecho* y el HgS precipita de una problemática solución, no se compaginan ni los tiempos, ni las proporciones de uno y otro componente de la actual roca.

Otros dos puntos merecen comentario: el idiomorfismo generalizado de los granos de cuarzo observado por nosotros, al que ya hemos aludido, y la compacidad de la roca mineralizada. Las pequeñas partículas de cuarzo (detritus) que originalmente sedimentaron, evolucionaron, por redisolución y precipitación epitáxica, a pequeños cristales, y ello lo hubieron de hacer en el seno de una solución, o empapados de ella, pero con la superficie y el medio limpios y en el tiempo necesario. Esta es, al menos, parte de la diagénesis del sedimento. Solo así pudieron formarse esos cristales de SiO_2 tan espléndidos como minúsculos. Si el HgS hubiese precipitado singenéticamente, ciertamente hubiera interferido este proceso. En nuestra opinión las cavidades (poros) erizadas de cristalinis de cuarzo, estaban ya formadas antes de la mineralización y se *llenaron* con HgS de forma *total y compacta*, lo cual no es explicable por crecimiento directo de cristales de HgS desde una solución. Ni la compacidad es explicable por compresión posterior de todo el sedimento como demuestra la experiencia en la metalurgia de polvos.

Por último, ¿por qué y cómo la mineralización *sucesiva* de los tres niveles encontrados? Este punto será ya difícil de zanjar por haber desaparecido, durante la explotación, los niveles superiores y disponer de una información imprecisa.

2. Origen

Saupé trata por separado las *llegadas* del mercurio y del azufre, porque —dice— *solo* hay una evidencia de que sus ciclos geoquímicos han sido, en parte, paralelos: la presencia de cinabrio en las rocas volcánicas. Por ello se decide a buscar, también por separado, el origen de ambos elementos, Hg y S.

Teniendo en cuenta las 250.000 t de mercurio en que se ha estimado lo rendido, hasta la fecha, por el yacimiento de Almadén, hay que encontrar, por lo menos, las correspondientes 45.000 t de azufre para la formación del HgS; lo cual no le parece difícil recordando que el volcán Siretoko-Jozan (islas Curiles) emitió en 1936, y en una sola colada, 200.000 t de un azufre purísimo. El azufre necesario pudo haberse producido, en opinión de Saupé, por reducción bacteriana de sulfatos disueltos, salvada la toxicidad del mercurio que debería haber en el medio para poder precipitar como sulfuro.

En cuanto al origen del mercurio, descarta, uno tras otro, los diversos orígenes que se plantea como posibles. Así, por ejemplo, le parece inútil polemizar sobre el *batolito**, dado el carácter anchimetamórfico de todos los sedimentos estudiados y la ausencia de canales de alimentación. Para Saupé la única prueba del batolito es el yacimiento mismo.

El hecho de que el nivel portador se halle mineralizado en una pequeñísima parte de su total extensión continental y de que sean diferentes las dos cuarcitas del nivel portador de Almadén, decide a Saupé a excluir una precipitación directa del mercurio a partir del agua del mar. Por eso, también el modelo de una *concentración sedimentaria* en arcillas o esquistos le parece a este autor plausible teniendo en cuenta el carácter excepcional de Almadén; apoyándose, además, en la serie estratigráfica establecida (grandes espesores de *argillites* conteniendo materia orgánica). Pero para confirmar la hipótesis habría que compaginar la gran extensión lateral de los horizontes del ordovícico con la pequeña superficie que ocupa la mineralización localizada en Almadén. Y, aunque para ello se ha propuesto que, *precisamente allí*, existiera una materia orgánica particularmente abundante o de un tipo *especial*, y que el escaso metamorfismo en Almadén no llegase a dispersar la pre-concentración, todo ello está pendiente de estudio.

Reconoce, sin embargo, que hay varios hechos que permiten pensar en un origen *volcánico*: 1) la presencia de mercurio en las lavas del silúrico y del devónico; 2) la coincidencia espacial demostrada—sobre el terreno y por gravimetría— del máximo del volcanismo silúrico y devónico con la zona mineralizada con mercurio; 3) la relación geotectónica del mercurio con el cinturón de fuego; 4) la frecuente relación del mercurio con las manifestaciones volcánicas y postvolcánicas; 5) la presencia repetida de rocas volcánicas en la proximidad de los yacimientos.

Pero, a pesar de todo, apoyándose en que las rocas volcánicas del paleozoico medio pueden ser tanto ácidas (Turquía) como básicas (Europa) concluye que la *relación* entre volcanismo y mercurio no es necesariamente una *filicación*.

Efectivamente hay que matizar entre *relación* y *filicación*: la relación puede suponer un parentesco más lejano. Pero si la evidencia

(*) Batolito: masa rocosa profunda que, en estado fluido, alcanzó las capas más elevadas de la Tierra y solidificó.

apunta hacia la filiación, lo que hay que demostrar es que no la hay; dicho de otra manera, hay que explicar qué otra clase de relación puede existir para que se dé tanta y tan importante coincidencia. No está claro por qué la naturaleza ácida o básica de las rocas puede llevarle a esa conclusión. Es verdad que un magma básico sería más desulfurante (podría retener más S⁼) que uno ácido, pero nunca hasta el extremo de impedir una segregación o diferenciación magmática con la aparición de la fase sulfurada.

Como hemos dicho, Saupé se decide a encontrar por separado los orígenes del S y el Hg porque le parece poca evidencia para aceptar que tuvieron ciclos geoquímicos paralelos, la presencia del cinabrio en las rocas volcánicas. Pues bien, he aquí un hecho —el de la presencia de cinabrio en las rocas volcánicas— en el que, con puntos de vista distintos, ambos pretendemos encontrar razón bastante para muy diferentes interpretaciones de un mismo fenómeno. Para nosotros esa presencia de cinabrio, y en esas rocas, es *precisamente* la evidencia de que el cinabrio era ya en el magma una fase segregada —como lo eran las 200.000 t de azufre que salieron por el Siretoko-Jozan— o que al menos sus componentes eran mayoritarios, aunque no fueran únicos, en una fase fluida residual de la diferenciación magmática. Por otra parte ¿es que la reiterada *asociación natural* del azufre y los metales, consecuencia de su bien conocida afinidad química no obliga, por el contrario, a pensar en una relación geoquímica que ya fue intuida por nuestros clásicos?

Para nosotros está clara la asociación genésica volcanismo-mineralización; y es bastante que Saupé la considere posible. La heterogeneidad del manto es, ciertamente, hipotética, pero desde el momento que ya no se discute la diferenciación magmática —la segregación de distintas fases en el seno del magma— esa heterogeneidad es menos hipotética y más consustancial.

La realidad de Almadén es una roca cuarcítica sedimentaria *impregnada* del cinabrio —y de mercurio metálico—, que no es lo mismo que el producto de una sedimentación y precipitación simultáneas de dos compuestos radicalmente distintos (SiO₂ y HgS) —tanto por su naturaleza como por su origen—, produciendo lo que se ha llamado una «concentración por sedimentación». Si se enunciara un origen común que explicara la excepcional «concentración» de HgS y que a ella se pudiera haber llegado en una sola etapa, se mejoraría la probabilidad del hecho de la mineralización; es una alternativa a la

interpretación que hace necesaria la repetición de una serie de hechos singulares e hipotéticos, lo que quita fuerza a la hipótesis, y hace al fenómeno general mucho menos probable según esta interpretación.

Efectivamente, de la relación de volumen de rocas volcánicas a volumen de rocas sedimentarias se deduce que el proceso de «concentración» en Hg tuvo que ser extraordinariamente eficaz, tanto que, en nuestra opinión, sólo si se cuenta con la segregación o diferenciación magmática puede pensarse en un HgS asociado al fenómeno volcánico en forma de una gran masa suficientemente fluida y especialmente rica en Hg y S, sin destacar la posible intervención del H₂O y el CO₂ (?), todos de notable volatilidad.

En cuanto al propuesto origen de los iones S⁼ en la posible reducción bacteriana de los SO₄⁼, ¿a qué distancia de lo probable se puede razonablemente situar ese bio-proceso teóricamente posible, si se tiene en cuenta lo que pudiéramos llamar «rendimiento» o «productividad» de las bacterias y la continuidad de su actuación a lo largo de millones de años? ¿Qué población de estos microorganismos específicos hubo de concentrarse en un lugar donde no debieron faltar ni aguas sulfatadas, ni las condiciones necesarias para la transformación, ni, naturalmente, mercurio en forma iónica? A nuestro entender lo razonable, lo evidente, y hasta lo más fácil de explicar, es que el azufre y el mercurio llegaron juntos, ya combinados, por razones geoquímicas, por afinidades indiscutibles e irresistibles.

La «concentración» de HgS en Almadén es tan sorprendente que Saupé mismo califica al yacimiento de «monstruo mineralogénico», y no le encuentra explicable por una precipitación directa, por eso acude a la pre-concentración de Hg por un indefinido mecanismo que, a su vez, se diluye entre arcillas, esquistos, y materia orgánica *especial*, de los cuales puede que haya rastros en el entorno pero no de forma significativa en la cuarcita mineralizada.

Lo que en geología se denomina *concentración sedimentaria* podría denominarse en química *precipitación continuada o sostenida*, para lo cual se necesita la reposición de los reactivos que en el proceso se van consumiendo. Es decir, habría que reponer Hg⁺⁺ y S⁼ —y Hg metálico, no se olvide que en el yacimiento existe en relativa abundancia este metal en estado elemental— durante milenios y sobre un punto concreto de la superficie del planeta que hemos llamado Almadén. Poco más o menos —dada la insolubilidad del HgS— que un volumen de agua equivalente al contenido en todos los mares y

océanos hubiera pasado por allí y dejado su tributo de mercurio en forma de sulfuro para «sellar» la porción más porosa de una roca cuarcítica que hubo en ese singular punto del globo.

La polémica existencia del *batolito* le parece únicamente probada por la existencia del yacimiento mismo. ¿Y no pudiera ser prueba bastante si, como se reconoce en otro sitio, más que ausencia de canales de alimentación lo que puede ocurrir es que aún no se hayan encontrado, acaso por no haberse buscado con fe?

La no comparecencia de los conductos o canales de llegada del fluido mineralizante, parece ser un hecho geológico muy generalizado, casi universal, en las investigaciones mineralogénicas; por eso este hecho afecta a nuestra hipótesis en la misma medida que a cualquier otra fluido-termal. No sabemos si los estudios geológicos del yacimiento autorizan a descartar que esos canales puedan aún encontrarse, pero, en cualquier caso, las peripecias del yacimiento pudieran muy bien haber ocultado, trastocado o transformado este eslabón, de momento, perdido.

Mecanismo

Empezaremos recordando que cualquiera que sea el mecanismo que se postule, tiene que contemplar, entre otros, los siguientes hechos:

a) La excepcional riqueza y localización de las masas mineralizadas, si se tiene en cuenta el *clarke* para el mercurio.

b) Su paragénesis simple (cinabrio), prácticamente monometálica y, a la vez, la presencia, aunque sea minoritaria, de otros minerales (pirita, calcopirita, galena, blenda).

c) La disposición relativa HgS-SiO_2 en la cuarcita, y la forma y características cristalinas de ambos compuestos.

d) La presencia de mercurio metálico como constituyente importante.

e) La disposición superpuesta de los volúmenes mineralizados.

f) Su relación con el volcanismo.

Saupé propone para Almadén un modelo genético que, en su opinión, es, naturalmente, el que mejor se ajusta al conjunto de observaciones hechas y el que tiene mayor probabilidad de aproximarse a la realidad por presentar un mínimo de contradicciones factuales. Re-

conoce, sin embargo, el carácter hipotético —por no decir especulativo— de su modelo, que, admite, es modificable y mejorable.

Parte de lo que pudiéramos llamar el hecho Ibérico: la especialización metalogénica peninsular en metales calcófilos —al menos a partir del Cámbrico— que, según él, pudieran haber sido *liberados por erosión*.

Sin embargo, como los análisis realizados de rocas Precámbricas, o del Cámbrico inferior, en Almadén, no han dado contenidos anormales de mercurio, tiene que pensar en un primer e hipotético proceso de concentración que, sin ninguna base real, enuncia así: *Hubo una sedimentación péltica fina, rica en materia orgánica, que fijó el mercurio por absorción sobre las arcillas o, más probablemente, por intermedio de compuestos organomercuriales*.

Como, en principio, el contenido en metales calcófilos de las rocas magmáticas no es, en números relativos, muy diferente de unas a otras, y la llamada «liberación por erosión» debió de afectar a todas las que se encontraran en situación de serlo por el fenómeno erosivo, si la «liberación» que se postula fue por disolución, los metales pasarían *todos* a una forma aún más dispersa —la solución— a partir de la cual, por precipitación selectiva, se hubieron de «concentrar» en los actuales yacimientos. La «especialización metalogénica» reconocida a la península Ibérica quiere decir que, sorprendentemente, los metales se han distribuido, después de su disolución, con una especie de criterio regional —muy constitucional— tan increíblemente notable que uno se plantea, por lo menos, las siguientes cuestiones: 1) ¿Dónde y en qué forma concreta se encontraban originalmente esos metales? 2) ¿Cómo se «liberaron» (por disolución, por erosión, por disgregación)? 3) ¿Con qué criterios y por qué mecanismos se produjo la separación y «concentración» *localizada*?

La cuarcita *limpia* que va a ser mineralizada se reconoce azoica. No hay en ella restos ni de las arcillas adsorbentes, ni de la materia orgánica *especial*. El mercurio se da ya por supuesto en el medio, dispuesto a adsorberse sobre arcillas o a fijarse en compuestos organo-mercuriales; lo que, por cierto, requiere un tratamiento mucho más serio porque sólo el capítulo de estos compuestos y el de la bioquímica del mercurio son demasiado importantes y complejos como para utilizarles en un proceso clave de la hipótesis —la preconcentración— sin desarrollar químicamente la idea.

Desde el ungüento sarraceno a los modernos estudios de la cito-

toxicidad del mercurio, la química de este elemento se ha desarrollado casi exclusivamente en los campos orgánico y bioquímico, no solo interviniendo en la molécula de los compuestos, sino actuando como catalizador de importantes reacciones como la de oxidación del naftaleno a anhídrido ftálico, y la de hidratación de acetileno a acetaldéido, ambas descubiertas hace un siglo. Por cierto que ésta última, utilizada en una industria situada en la bahía de Minamata (isla japonesa de Kyshu), desencadenó la fatal enfermedad que afectó a la comunidad de pescadores de la isla a partir de 1953; enfermedad conocida, hasta que se aclararon sus causas, como «enfermedad de Minamata». Una vez relacionada con la industria allí instalada, y concretamente con el mercurio —del que se perdía un kilogramo por tonelada de acetaldéido producido— el problema se investigó con la profundidad que su gravedad requería, obteniéndose unos resultados que creemos oportuno resumir aquí: 1) se trataba de una intoxicación por compuestos organomercuriales; 2) la acción bacteriana en los sedimentos del fondo, o en el pescado en descomposición, pudo convertir el mercurio inorgánico tanto en el ión metilmercurio, *soluble en agua*, como en el dimetilmercurio, *volátil*; 3) el lodo anaeróbico en las aguas poco profundas de Minamata, pudo llevar a cabo esta metilación.

Si fuera en este tipo de fijación organometálica en el que trata de basarse la preconcentración postulada por Saupé, lo descubierto con motivo del desastre de Minamata no parece apoyar la idea si resulta que el mercurio se «fija» en una forma *soluble* o en un compuesto *volátil*.

Por otra parte, las proteínas extra e intracelulares, los ácidos nucleicos, las membranas, las mitocondrias, el aparato mitótico, etc., todos contienen numerosos ligandos para el átomo de mercurio, incluyendo el más caracterizado: el -HS. Por ello, la adición de mercurio a estos sistemas produce desarreglos funcionales. Todos los compuestos de mercurio son citotóxicos, pero los organomercuriales lo son aún más que los inorgánicos. Así, pues, cualquier efecto biológico debe interpretarse en términos del estado químico del mercurio, de su distribución, de su metabolismo, y de la composición y función de las células, afectadas siempre en importantes procesos.

La gran sensibilidad de las modernas técnicas de análisis ha facilitado la interpretación de procesos a nivel celular cuya importancia no debe extrapolarse a la escala geoquímica sin un previo y riguroso

estudio. Por ejemplo, se sabe que las algas marinas pueden acumular mercurio hasta cien veces el contenido en el agua de mar, lo cual es una cantidad relativa importante, pero, como cantidad absoluta, sigue siendo irrelevante a nuestros efectos, aunque los microorganismos anaerobios no lo devolvieran al medio en una forma soluble o volátil.

Los movimientos tónicos provocaron, según Saupé, una sedimentación clástica más grosera en un medio poco profundo. Esta sedimentación no fue uniforme y se inició y acabó de forma brusca. Paralelamente se produjo la actividad volcánica que supone precedida por la aparición de cúpulas térmicas, modestas en cuanto a temperatura alcanzada, pero suficientes para iniciar movimientos de convección de fluidos en dirección de los centros calientes, arrastrando el mercurio. La llegada de las lavas sería posterior.

Para la incorporación de metales a esas aguas —por ejemplo el mercurio que, se dice, arrastraron— es necesario no sólo ponerlas en movimiento con esa hipotética convección, y que sean disolventes potenciales de las formas minerales en que se encuentran los metales, sino hacerlas circular por rocas que los contengan, *percolando* a través de ellas, no utilizando vías fáciles; y, también, que se dieran las condiciones hidrogeológicas apropiadas.

Con esta manera de ver los fenómenos se pretende justificar: a) que la mineralización fue anterior al volcanismo; b) la participación de ese volcanismo, ya que su coincidencia no permite ignorarle.

Se puede también pensar que los fenómenos se han visto de tal manera que la mineralización fuese anterior al volcanismo, y que la manifestación de éste se limitó a iniciar y mantener la convección de fluidos, por cierto en un medio que se declara poco profundo. Pero, de nuevo hay que insistir preguntando: ¿de dónde esos fluidos? ¿de dónde el mercurio arrastrado? ¿no supondría ello una nueva dispersión por redisolución? Cuando se postula un transporte por fluidos imaginados y, a la vez, se reconoce que no se sabe bajo qué forma, el propio fenómeno del transporte queda en precario.

La idea de «movilización» y «removilización» es un curioso recurso interpretativo al que acuden con mucha frecuencia Neptunistas y Neoneptunistas. Su enunciado sorprende, al menos a quienes nos acercamos al problema desde muy diferentes escalas. Según estas ideas, minerales o metales ya concentrados localmente se extraen y ponen en movimiento, de forma prácticamente total y selectiva, para ser trasladados a otro sitio, donde vuelven a ser depositados en forma

mucho más concentrada. Se puede entender que un depósito se movi-lice y se *disperse*, lo que ya es bastante más difícil de entender es que, a escala telúrica, funcione de forma natural un sistema de concentración con tantas y tan poco verosímiles implicaciones.

Como alternativa a la disolución en forma polisulfurada alcalina, Saupé propone la intervención de CO_2 al que parece reconocérsele, cada día más, un papel en los fenómenos de mineralización. Esta alternativa, en su opinión, concuerda con dos hechos: la elevada solubilidad de CO_2 en soluciones diluidas, y el carácter diluido de las soluciones asociadas a los yacimientos de mercurio. No falta a esta alternativa sino un pequeño detalle: que el sistema químico que en ella se esboza —la química del mercurio en soluciones acuoso-carbónicas— se establezca por vía experimental. Hasta que no se explore experimentalmente el efecto del CO_2 sobre soluciones mercúricas, parece difícilmente sostenible que se esté ofreciendo una alternativa válida.

Las soluciones mercuriales —que se dan por obtenidas— fueron vertidas, según el mismo autor, en las hondonadas del sedimento arenoso, y precipitaron bajo una interfase cuya naturaleza no se ha precisado; pudo ser el límite de óxido-reducción en el contacto de dos capas de agua diferentes. Esta «interfase límite», parece haber seguido, al menos en parte, la interfase sedimento-agua, pero allí donde ese «límite» se encontrara en agua libre, precipitaría el cinabrio masivo en el que dice haber observado figuras sedimentarias.

Según esto, debe entenderse —por ininteligible que parezca— que el vertido de esas soluciones mercuriales se hizo desde el propio seno del agua. De ser así —prescindiendo de que seguimos sin saber de dónde proceden esas soluciones— no se entiende por qué desplazaron al líquido que ya llenaba esas fosas sin diluirse en él. La precipitación —se supone que del sulfuro— se localiza bajo una «interfase» de naturaleza desconocida que más bien correspondería a una zona de transición de las condiciones físico-químicas del medio. Este «límite», según se dice, siguió el perfil de la «línea» sedimento-agua, pero cuando esa «línea» se situaba en el agua libre, precipitaba cinabrio masivo. Aun aceptando, por un momento, esta «geológica historia» quedarían sin aclarar al menos las siguientes cuestiones: ¿qué efecto tuvo la llamada «interfase»? ¿nuclear la precipitación? ¿por qué y cómo? ¿cómo se pueden apreciar figuras de sedimentación en unos

cristales que crecen en un medio libre? ¿cómo se producía y se sostenía la sobresaturación?

El depósito de HgS y de cuarzo detrítico no pudo ser simultáneo porque los granos de cuarzo en contacto con el cinabrio ofrecen planos cristalográficos, y la recrystalización de los detritus que esas formas idiomórficas representan no se hubiera podido producir después de la impregnación por precipitación. El precipitado de HgS necesariamente fino, casi coloidal, habría de haberse producido cuando el cuarzo ya hubiera recrystalizado, lo cual hace muy difícil la simultaneidad del depósito. Por otra parte, los detritus fueron suficientemente gruesos como para experimentar una sedimentación rápida; no puede imaginarse el crecimiento de las masas cristalinas de HgS que existen en el yacimiento, desde una solución. Podrían ser, en todo caso, el producto de la compactación del precipitado pulverulento entre los cristalitos de cuarzo que afloran a las cavidades, pero el grado de compacidad de la roca de Almadén no se pudo alcanzar más que por impregnación de la roca cuarcítica después de su diagénesis. Un sulfuro de mercurio macro-cristalino como el cinabrio de Almadén, y mucho menos cuando está en forma masiva, no puede formarse, dada su extraordinaria insolubilidad, por precipitación desde una solución, ni por compactado de un precipitado fino; por estos procesos su real disposición en la roca es químicamente incomprensible. No cabe una formación singenética de sedimentos tan uniformemente heterogéneos, constituidos por partículas radical y químicamente tan distintas.

Una vez que se detuvo el depósito de cinabrio en el primer lentefón (San Pedro y San Diego), se empezó a depositar el material que dio lugar a la cuarcita blanca estéril, al gres negro y a las argilitas intermedias. La diagénesis de la cuarcita comenzó a consolidar este conjunto, que quedó protegido por la sedimentación pelítica que le cubrió. La disminución del contenido hacia el fondo y hacia los lados del cuerpo mineralizado, implica que las soluciones difundieron desde las hondonadas para impregnar los niveles arenosos aún no consolidados, lo cual pretende explicar el variable singenetismo según la parte del yacimiento considerada. La mineralización quedó protegida tanto del metamorfismo como del volcanismo.

Según esto, la precipitación se interrumpió bruscamente cuando aún el medio líquido cubría los fondos, cuando aún seguían sedimentando los otros materiales. Pero ¿cómo puede explicarse un fenó-

meno tan insólito? ¿Faltó soluto? ¿Cambiaron las condiciones, precisamente las que afectaron a la precipitación del sulfuro? Por otra parte la difusión de las soluciones desde las zonas más profundas—lo que en sí, es un fenómeno a explicar— supone una dilución. ¿cómo impregnar otros niveles y mineralizarlos desde concentraciones más bajas? Si la mineralización hubiera sido por un fluido ascendente, condicionada a cierta temperatura, la presencia de un nivel de agua próximo sobre la cuarcita pudiera haber producido en ésta, por mala conductora, un gradiente de temperatura muy acusado que impediría, con la brusquedad observada, la mineralización de la cuarcita —digamos— refrigerada.

En opinión de Saupé, en un nuevo episodio arenoso llegaron otras varias «emisiones de soluciones mercuríferas»; dos de ellas importantes. Aparece, después, una sedimentación pelítica que, de nuevo, recubre todo, seguida de manifestaciones volcánicas en las que participan fluidos. Los puntos de emergencia de los fluidos parece que fueron muy estables, ya que sólo así se explica la superposición de los sucesivos episodios de mineralización después de la explosión. Posteriormente las emisiones volcánicas submarinas alternaron con una sedimentación detrítica. Las trazas de cinabrio en las rocas volcánicas silúricas y devónicas podrían haber sido arrancadas, según el autor que comentamos, al atravesar los horizontes mineralizados.

Son demasiados hechos —reales o imaginados— forzados a una relación, o a una falta de ella, por hipótesis que perdonan demasiadas cosas ignoradas. Hacen falta muchas plausibles ganas de entender e interpretar el hecho desafiante de la mineralización —y hacerlo, contumaces, de una determinada manera— para insistir en una inexplicable teoría de disoluciones que transportan el metal no se sabe cómo, a un determinado sitio, en el momento oportuno, y emergen con no menos sorprendente perseverancia. Hay, sin embargo, un reconocido trasfondo volcánico alternando con la sedimentación detrítica que nos parece esperanzador, si se acepta, además, que las trazas de cinabrio en las rocas volcánicas son genésicas, no accidentales.

Aún tomando en consideración la interpretación sedimentaria, hay importantes diferencias respecto a los yacimientos llamados volcano-sedimentarios. Las rocas asociadas son diferentes y su posición relativa es también singular (las lavas, por ejemplo, se sitúan sobre la mineralización).

4. *Evolución ulterior*

El sulfuro de mercurio, precipitado o de impregnación, es un componente químicamente estable. Sólo cabría una redisolución —removilización para los geólogos— por formación de complejos solubles —impensables como proceso geológico— o la descomposición térmica que, ciertamente, no se ha producido.

La concentración así obtenida, llamada *sedimentaria*, no se dispersó porque no hubo ni removilización ni metamorfismo.

Lo difícil en el caso del cinabrio sigue siendo explicar por qué aparece concentrado en algunas partes de la cuarcita, no por qué no se ha dispersado. La insolubilidad del HgS es válida no sólo para explicar la concentración de mercurio por su precipitación como sulfuro, sino para hacer prácticamente imposible —geológicamente imposible— su «removilización» por vía acuosa. Por eso creemos que sobran las alusiones que suelen hacerse a la protección del depósito por impermeabilización.

Las ideas de Saupé se pueden resumir así: El mercurio en Almadén fue atrapado por sulfuración, en arenas no consolidadas, antedigenéticas. Esto lo deduce de los microscópicos detalles sedimentarios que dice haber observado en el cinabrio casi puro, que son —a su entender— prueba de depósito en una interfase agua-sedimento. La correspondencia local entre la zona mineralizada y el máximo alcanzado por el volcanismo Siluriano-Devoniano, es un hecho deducido de consideraciones geológicas y de estudios gravimétricos. La alternativa para la interpretación estaba entre un modelo exhalativo y uno convectivo, ya que ambos se podrían ajustar a las dos conclusiones citadas. Prefirió el convectivo, en el cual el volcanismo sólo habría intervenido en la mineralización aportando la energía necesaria, no el mercurio. Entre las razones que ligeramente le inclinaron en favor de este modelo, la más importante fue la ausencia de cinabrio en las rocas volcánicas más antiguas, y su presencia, sin embargo, en rocas ligeramente posteriores al episodio volcánico Silúrico.

El carácter aleatorio e inseguro de todos estos modelos e hipótesis, a veces contradictorias, invita a aportar algunas ideas que contribuyan a alcanzar la masa crítica de conocimientos que puede resolverse en luces para misterios.

Son muchos los autores leídos, que nos dieron vela para este nacimiento, ya que, según su general opinión, *puesto que todos los grandes depósitos minerales exigen un elevado grado de no frecuentes coincidencias para que hayan podido formarse, ninguna hipótesis debe rechazarse sin un cuidadoso examen.*

Por otra parte, no sería ni justo ni correcto acabar estos comentarios sin ofrecer nuestra propia interpretación, que se basa en las siguientes conclusiones deducidas de los resultados de nuestras investigaciones sobre el mineral de Almadén:

1. La impregnación de la cuarcita mineralizadas por HgS es *total*. El HgS mineralizante ocupa por completo las cavidades y espacios vacíos, inter e intracrystalinos, de la roca. Hubo impregnación pero no pudo haber *circulación* de soluciones.

2. Las masas compactas de HgS que *llenan* esas cavidades y espacios reproducen, con sorprendente fidelidad, todos los detalles de su superficie penetrando hasta los lugares más inverosímiles. Un «vaciado en cinabrio» de las características observadas sólo pudo realizarse por una fase fluida; el cinabrio no es un cristal *crecido* en ese espacio sino *solidificado* en él (figs. 11 y 12).

3. A pesar de la fidelidad con que el HgS moldea estos huecos y reproduce los detalles superficiales de los cristales de SiO₂ en contacto con él, la cohesión entre ambos minerales —cinabrio y cuarzo— es mínima. Esta falta de cohesión se explica por la absoluta falta de afinidad entre el SiO₂ y el HgS (fig. 9).

4. En un ensayo de síntesis según nuestra hipótesis, el sulfuro de mercurio fundido impregnó, sin atacar, a una cuarcita desmineralizada (fig. 16).

5. La cuarcita impregnada está formada por un agregado consolidado de microscópicos cristales *idiomórficos* de SiO₂, más o menos desarrollados en tamaños y perfección, que ofrece espacios intercrystalinos, e interconcentrados, que dieron porosidad y permeabilidad a la roca (figs. 4, 5 y 7).

La formación de estos cristales idiomórficos a partir de detritus de cuarzo sedimentados en un fondo marino, se explica por disolución y reprecipitación epitáxica durante la diagénesis, y puede tener lugar a una temperatura ambiente en un espacio de tiempo relativamente corto como han demostrado experimentalmente MacKenzie y Gees.

6. La paragénesis es muy simple; si se prescinde de la ganga —también prácticamente única— el único mineral es HgS, que coexiste con pequeños cristales, escasos y dispersos, de pirita, y con cantidades variables de Hg metálico (figs. 6, 13, 14 y 15).

El HgS es compacto. El Hg puede encontrarse alojado en el propio mineral —al que moja parcialmente— o en gotas macro o microscópicas distribuidas por la roca encajante a cuyos cristales no moja, razón por la cual aparecen en forma esférica. Los pocos cristales de pirita constituyen una fase minoritaria, aunque bien diferenciada. Todas las fases sulfuradas, incluido el HgS, contienen, en solución sólida, pequeñas cantidades de los otros metales (figs. 6 y 14).

7. Los estudios realizados sobre las menas de Tarna y Caunedo, permiten extender a ellas las conclusiones anteriores con la sola diferencia de la naturaleza de la ganga. No se ha encontrado en ellas Hg metal (figs. 17, 18, 19, 20 y 21).

Lo que ofrecemos a la consideración de geólogos y mineralólogos es una serie de hechos estructurales encontrados en algunos minerales sulfurados que, contemplados desde la perspectiva geológica con la intención de una interpretación genésica, nos han permitido comentar, como lo hemos hecho, los modelos e hipótesis hasta ahora propuestos.

El cinabrio y el mercurio metálico coexistente —hállense donde se hallen (grietas, filones, inclusiones)— tienen el mismo origen. Y ese es el desafío: interpretarles de forma coherente sin acudir a nada probables situaciones geológicas amparados en singulares y no experimentadas condiciones de temperatura, tiempo, presión, composición y reactivos que, si ciertamente pudieron explicar muchas cosas, entre éstas nunca estarán las científicamente cuasi-inexplicables; por mucha comprensión que se ponga en juego siempre quedan cosas absolutamente incomprensibles (Malebranche).

La posible segregación magmática de una fase fluida terminal especialmente rica en Hg y S, está no sólo avalada sino determinada tanto por la afinidad de ambos elementos como por la inmiscibilidad

de las fases sulfuradas con los magmas silicatados. Por otra parte, los singulares bajos puntos de fusión y de ebullición tanto del Hg (-39° y 350° C), como del S (114° y 444° C), permiten concebir en el sistema formado por ellos no solo la evidente formación del compuesto HgS —con punto de fusión congruente* relativamente elevado (825° C a 70 atm)— sino la existencia a T más bajas de una fase homogénea especialmente fluida, con un contenido en Hg superior al estequiométrico (86,22 por 100 en peso). La parte rica en Hg (por encima del 86,22 por 100) en el diagrama de equilibrio del sistema Hg-S, cabe interpretarle o como una solución de S en Hg cuyo estado —fases presentes y composición de las mismas— dependerá de: a) la composición *global* del sistema; b) la temperatura; c) la presión; o como un fundido de HgS con exceso de Hg con respecto a la composición estequiométrica. En cualquier caso, la singular volatilidad del Hg daría extraordinaria fluidez a la fase líquida. No debe olvidarse que el mismo H₂O es una fase segregada del magma más primitivo y homogéneo a la que no puede negársele la participación en cualquier sistema, lo cual no supone atribuirle la función de disolvente base.

Cuando las condiciones evolucionaran hacia la separación del compuesto HgS (por disminución de la temperatura o de la presión), el exceso de Hg se segregaría en forma metálica, como líquido o vapor, según las condiciones.

Si se puede aceptar que la diferenciación magmática es un hecho comprobado y utilizado en el razonamiento sobre otros procesos mineralogénicos; si las fases sulfuradas se reconocen como fases segregables en magmas silicatados; si la afinidad química entre el Hg y el S es un hecho que conduce al compuesto mercuríco inorgánico más estable (HgS); si en el sistema Hg-S se puede pensar en una fase extraordinariamente fluida —por la volatilidad de sus componentes— a temperaturas relativamente bajas para una composición no muy alejada de la estequiométrica para el HgS; y si el volcanismo asociado al yacimiento de Almadén ha permitido pensar en un origen volcánico para el mercurio, este yacimiento puede interpretarse como el resultado de la impregnación de la roca cuarcítica porosa por un fluido del sistema Hg-S-¿ H₂O? -¿ CO₂? con tal contenido en sus com-

(*) En los sistemas binarios *punto de fusión congruente* es aquél para el que en el equilibrio trifásico sólido-líquido-vapor las fases sólida y líquida tienen la misma composición.

ponentes esenciales —Hg y S— que exhibiera a una temperatura aceptable una notabilísima fluidez y solidificara en HgS a la vez que se liberaba el exceso del componente volátil (y acaso H₂O).

La naturaleza y edad del magma base del que, por diferenciación, se segregó el fluido mineralizante, no es un problema importante cuando, con carácter general, los magmas son, básicamente, fundidos silicatados cuyo margen de composición no influye en la inevitable segregación de ese fluido residual sulfurado.

En cuanto a la edad, digamos que tuvo que ser la necesaria para que el planeta, bajo su corteza consolidada, ocultara un magma «envejecido» en el que una fase sulfurada líquida, particularmente rica en HgS —y acaso H₂O— habría logrado formar la relativa gran masa que accedió a la cuarcita porosa.

La paragénesis simple, tanto de la mineralización de mercurio como de la de plomo, quedaría explicada si, como es perfectamente comprensible, la fase magmática sulfurada original hubiera experimentado a su vez, una diferenciación en los varios sulfuros, por inmiscibles, una vez alcanzadas por evolución natural (enfriamiento, por ejemplo) ciertas condiciones; la singularidad del sistema Hg-S daría cuenta de la pureza del cinabrio, y el contacto entre todas estas fases segregadas explicaría la presencia, después, en solución sólida, de otros metales, y la de pequeñas inclusiones de otros sulfuros en su masa así como la de cinabrio en las rocas volcánicas.

Así podría interpretarse sin necesidad de cabalísticas concentraciones por disolución, transporte, y precipitación, ese fenómeno del mundo mineral localizado bajo Almadén, una ciudad que tiene su historia y su futuro unidos al metal más singular y más español: el mercurio.

Señores Académicos: Espero haber merecido la indulgencia de geólogos y mineralogistas, y de todos Vdes. que hayan apreciado atenuantes bastantes para admitir como parcial y razonable mi osadía al proponerme desarrollar el apasionante y desafiante tema de la génesis de los minerales.

Nos hemos movido en un magma de ideas en el que si fases cristalinas —precisas y preciosas— han surgido bien diferenciadas como ideas claras, lo han hecho en el seno de un todo confuso en su origen pero cada vez más claro en su estructura actual y en su destino, que es estimular al hombre a emplear la inteligencia para entender el mundo —mineral o vivo— pero fuera de su raza inescrutable, des-

cubrir la única luz para las tinieblas que empiezan donde acaban las cavernas o el fondo abisal; y salvarse en el empeño.

Para quienes un día de mañana de un año acaso sin Señor, puedan leer lo dicho, quede constancia de la sincera humildad y honestidad con que está escrito. Bien quisiéramos haber conocido y vivido las razones que ahora se nos ocultan, pero acaso ellos —los que esto entonces lean— echen de menos nuestro gozo en el asombro y quieran también gozar en la ignorancia culta, leyendo los motivos aquí, como en un cuento que les devuelva a la infancia de una mineralogénesis llena de misterios solo iluminados por la imaginación y la fe de un Angelus para la *Tierra de donde sale el pan, que está revuelta, abajo, por el fuego* (Job).

BIBLIOGRAFÍA MÁS IMPORTANTE CONSULTADA

- AGRICOLA, GEORGIUS (1950). *De Re Metallica*. Translated from the first Latin Edition of 1556 by H. C. Hoover y L. H. Hoover. Dover Publications Inc. New York.
- ALMELA, A. y col. (1962). *Estudio geológico de la región de Almadén*. «Bol. Inst. Geol. y Min. de España», 73, 197 a 327.
- ALMELA, A. (1959). *Esquema geológico de la zona de Almadén*. «Bol. Inst. Geol. y Min. de España», 70, 317 a 330.
- ALMELA, A. y FEBREL, T. (1960). *La roca frailesca de Almadén, un episodio tobáceo en una formación basáltica del siluriano superior*. «Bol. Inst. Geol. y Min. de España», 59, 41-72. ú
- BAILEY, E. H. (1959). *Froth veins formed by immiscible hydrothermal fluids in mercury deposits, California*. «Bull. Geol. Soc. Amer.», 70, 5, 661-663.
- BARBA, A. *Arte de los Metales*. Imprenta del Reyno. Madrid, 1640. Edición facsímil de la de 1770 por Unión Explosivos Río Tinto, 1977.
- BARNES, H. L. (1967). *Geochemistry of Hydrothermal ore deposits*. Holt, Rinehart and Winston. Inc. New York.
- BARNES, H. L. y col. (1967). *Ore solutions chemistry: solubility of HgS in sulphide solutions*. «Econ. Geol.», 62, 957-982.
- BATEMAN, A. M. (1956). *The formation of mineral deposits*. John Wiley and Sons. New York.
- BAUMANN, L. (1976). *Introduction to ore Deposits*. Scottish Academic Pres, London.
- BECKER, G. F. (1894). *Sobre la teoría de la sustitución de Almadén*. «Bol. Real Soc. Esp. Hist. Nat.», 23, 226-233.
- BIRINGUCCIO, V. (1959). *The Pirothecnia* (traducción al inglés de la edición italiana de 1540). Basir Books Inc. New York.

- BOTT, M. H. P. (1972). *The interior of the earth*. Edward Arnold. London.
- CALVO, F. A. (1975). *Una nueva hipótesis mineralogenética sugerida por imágenes obtenidas en el SEM*. Universidad de Salamanca.
- CALVO, F. A. y GUILLEMANY, J. M.^a (1975). *Structure and Origin of mercury ore from Almadén, Spain*. «Trans. Sect. B Inst. Mining. Met.», 84, 146-149.
- CALVO, F. A. y GUILLEMANY, J. M.^a (1973 a 1978). *Estructura y génesis de sulfuros minerales de interés metalúrgico*. Departamento de Metalurgia. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense. Vols. I al XII.
- CONDIE, K. C. (1976). *Plate tectonics and crustal evolution*. Pergamon Press. New York.
- ESCOSURA Y MORROGH, L. DE LA (1878). *Historia del tratamiento metalúrgico del azogue en España*. Imprenta y Fundición de M. Telo. Madrid.
- EZQUERRA DEL BAYO, J. (1838). *Criadero de cinabrio de Almadén*. «Anal. Minas», 1, 335 a 339.
- EZQUERRA DEL BAYO, J. (1838). *Details géologiques sur Almadén*. «Bull. Soc. Géol. France», 10, 106-108.
- FÁBREGA, P. (1926). *Génesis de los criaderos metalíferos. Teoría termosifoniana*. «Mem. XIV Cong. Geol. Intern. 1279-1301».
- FRASER, D. G. (1977). *Thermodynamics in geology*. D. Reidel publishing Company. USA.
- HERNÁNDEZ SAMPELAYO, P. (1946). *Aportación a la bibliografía del mercurio en España*. «Bol. Inst. Geol. y Min. de España», 16, 375-381.
- HERNÁNDEZ SAMPELAYO, P. (1926). *Minas de Almadén*. XIV Congreso Geológico Internacional. Madrid.
- JEFFREYS, H. (1974). *The earth, its origin, history and physical constitution*. Cambridge University Press.
- KRAUSKOFF, K. B. (1967). *Introduction to geochemistry*. McGraw-Hill. London.
- KRAUSKOFF, K. B. (1951). *The physical-chemistry of quicksilver transportation in vein fluids*. «Econ. Geol.», 46, 498-523.
- KULLERUD, G. (1965). *The mercury-sulphur system*. Carnegie Inst. Wash. Year Book, 64, 193-195.
- Les roches plutoniques dans leurs rapports avec les gites minéraux*. Colloque en homenaje au professeur Raguin. Masson et Cia. Paris (1973).
- MACAULIFFE, C. A. (1977). *The Chemistry of Mercury*. Mac Millan.
- MACKENZIE, F. T. y GEES, R. (1971). *Quartz: Synthesis at earth surface conditions*. «Science», N. Y., 173, 533-535.
- MAGNUS, ALBERTUS (1967). *Book of minerals*. Clarendon Press, Oxford.
- MASON, B. (1958). *Principles of geochemistry*. John Wiley and Sons. New York.

- MOISEYEV, A. N. (1971). *Anon-magmatic source for mercury ore deposits?* «Econ. Geol.», 66, 591-601.
- Metallogeny and global tectonics*. Edited by Wilfred Walker. Benchumark papers in geology, vol. 39. Dowden, Hutchinson and Ross, Inc. Pennsylvania (1976).
- Ores in sediments*. Edited by G. C. Amstutz y A. J. Bernard. International Union of geological Sciences. Series A. Number 3. Springer Velag (1971).
- Origin and distribution of the elements*. Edited by L. H. Ahrens. Pergamon Press. Oxford (1968).
- PARK, C. F. and DIARMID, RAMAC (1975). *Ore Deposits*. W. H. Freeman and Company. San Francisco.
- PRADO, C. DE (1855). *Sur la géologie d'Almadén, d'une partie de la Sierra Morena et des montagnes de Tolède*. «Bull. Soc. Geol. France», 12, 182-204.
- RAGUIN, E. (1961). *Géologie des gites minéraux*. Masson et Cia. Paris.
- SAUPÉ, F. (1976). Discussion to *Structure and origin of mercury ore from Almadén, Spain* by F. A. Calvo and J. M.^a Guilemany. Transactions of Institution of Mining and Metallurgy. Section B, 85, 301-303.
- SAUPÉ, F. (Sept. 1973). *La géologie du gisement de mercure d'Almadén (Provincia de Ciudad Real, Espagne)*. «Sciences de la Terre», Mémoire n.º 29, Nancy.
- SMIRNOV, V. I. (1976). *Geology of mineral deposits*. Mir Publishers. Moscow.
- STANTON, R. L. (1972). *Ore petrology*. McGraw-Hill. New York.
- TUNELL, G. (1964). *Chemical Processes in the formation of mercury ores and ore of mercury and antimony*. «Geochim. Cosmochim. Acta», 28, 1019-1037.
- VAUGHAN, D. J. y CRAIG, J. R. (1978). *Mineral chemistry of metal sulfides*. Cambridge University Press.
- VERHOOGEN, J. (1938). *Thermodynamical calculation of the solubility of some important sulphides, up to 400° C.* «Econ. Geol.», 13, 34-51.
- Volcanic processe in ore genesis*. Proceedings of a joint meeting of the volcanic studies group of the geological society of London and the Institution of Mining and Metallurgy held in London (1977).
- WILMS, P. J. (1933). *San Alberto Magno. Su valor científico universal*. Tipografía de Archivos. Madrid.
- WOOD, B. J. y FRASER, D. G. (1976). *Elementary thermodynamics for geologists*. Oxford University Press.
- ZUCCHETTI, S. (1966). *Osservazioni sul giacimento mercurifero di Almadén in Spagna*. «Ind. Mineraria», 17, 529-537.

FIGURAS

Fig. 1 ($\times 2$) Mena de Almadén: Superficie de fractura en la que pueden verse gotitas de mercurio no sólo sobre el cinabrio sino también sobre la pirita.

Fig. 2 ($\times 100$) Mena de Almadén: Superficie pulida en lámina delgada observada por iluminación en campo oscuro. Pueden verse microlitos de cinabrio y trazos de gotas de Hg.

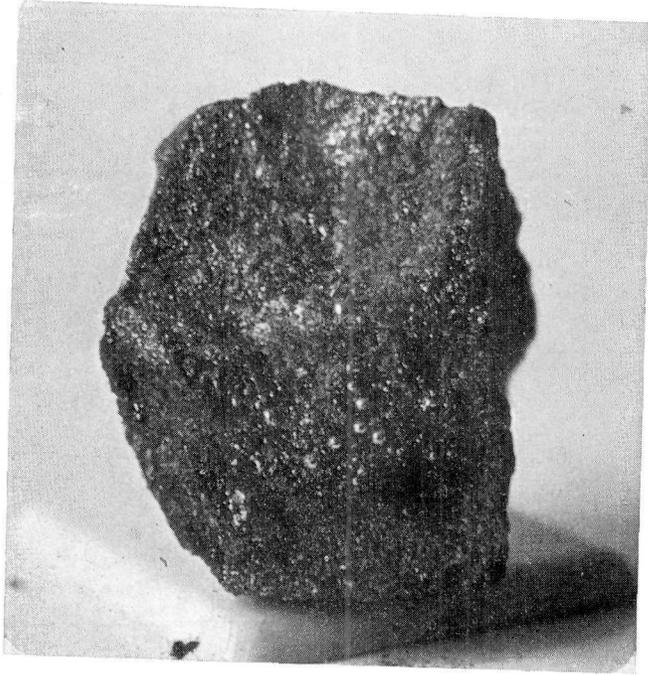


Fig. 3 ($\times 10$) Mena de Almadén: Ampliación de una micrografía de lámina pulida en la que aparecen distribuidos sobre la matriz cuarcítica —fondo blanco— masas más o menos voluminosas de cinabrio —en negro— así como microlitos de cinabrio y bandas de gotitas de mercurio (finísimos puntos negros).

Fig. 4 ($\times 31$) Mena de Almadén: Superficie de rotura examinada al Microscopio Electrónico de Barrido (Scanning) en la que aparecen cristalitas idiomórficas de cuarzo emergiendo de una masa alotriomórfica del cinabrio mineralizante.

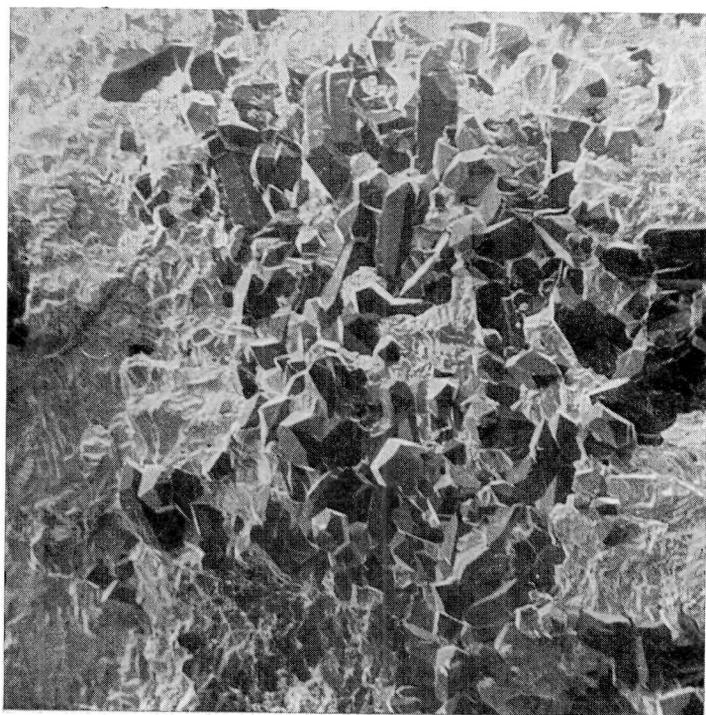
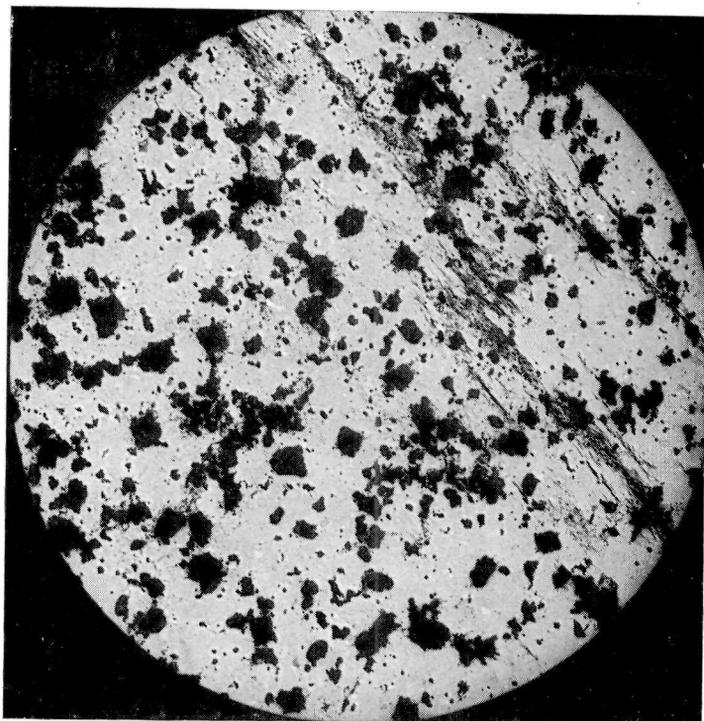


Fig. 5 ($\times 155$) Mena de Almadén: Detalle de la zona registrada en la figura anterior en la que puede apreciarse el idiomorfismo y maclado de los cristales de cuarzo así como la disposición entre ellos de las masas de cinabrio retenidas después de la rotura.

Fig. 6 ($\times 3050$) Mena de Almadén: Detalle de la micrografía anterior en la que sobre la cornisa del cristal de cuarzo en el centro de la figura, aparecieron las gotas de mercurio que se recogen en ésta.

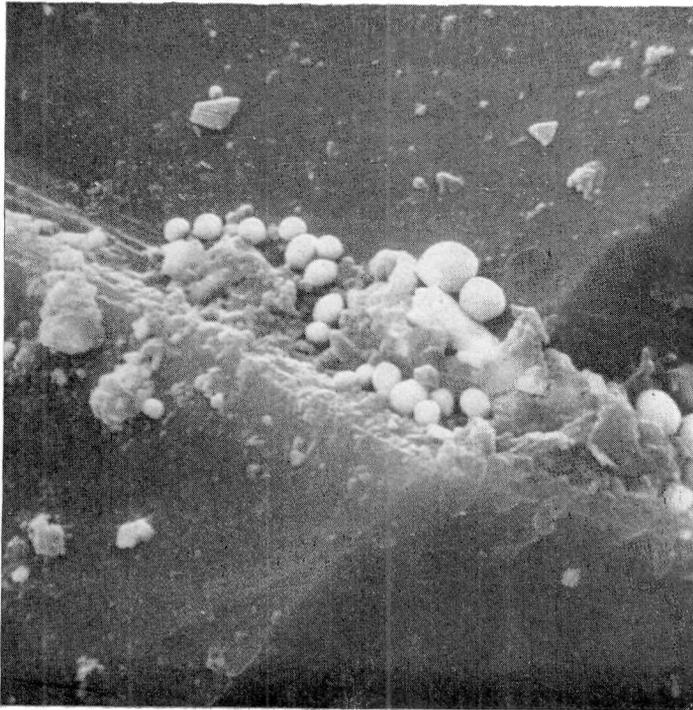
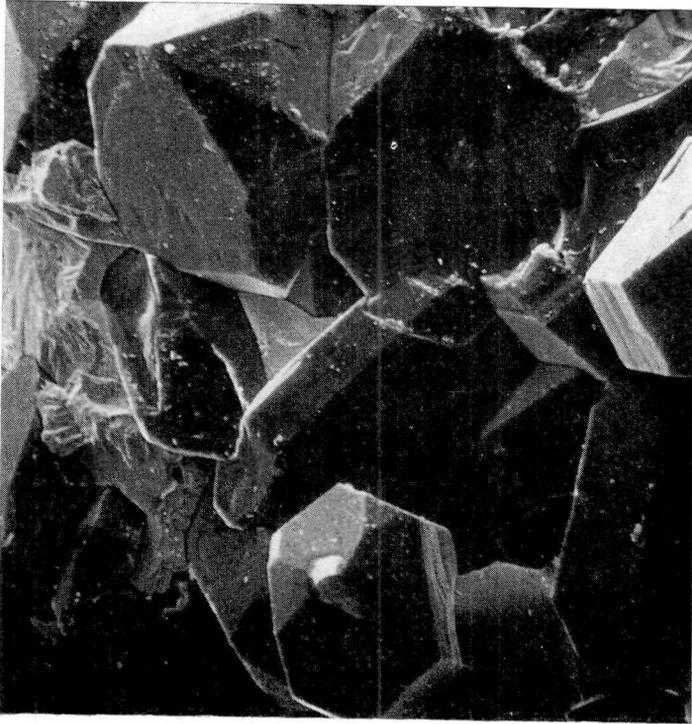


Fig. 7 ($\times 220$) Mena de Almadén: Zona de una rotura intencionada mostrando los cristales de cuarzo caóticamente dispuestos, mineralizados por el cinabrio.

Fig. 8 ($\times 1100$) Mena de Almadén: Detalle de la anterior figura. Obsérvese algunos defectos sobre la superficie de los cristales idiomórficos, maclados, de SiO_2 .

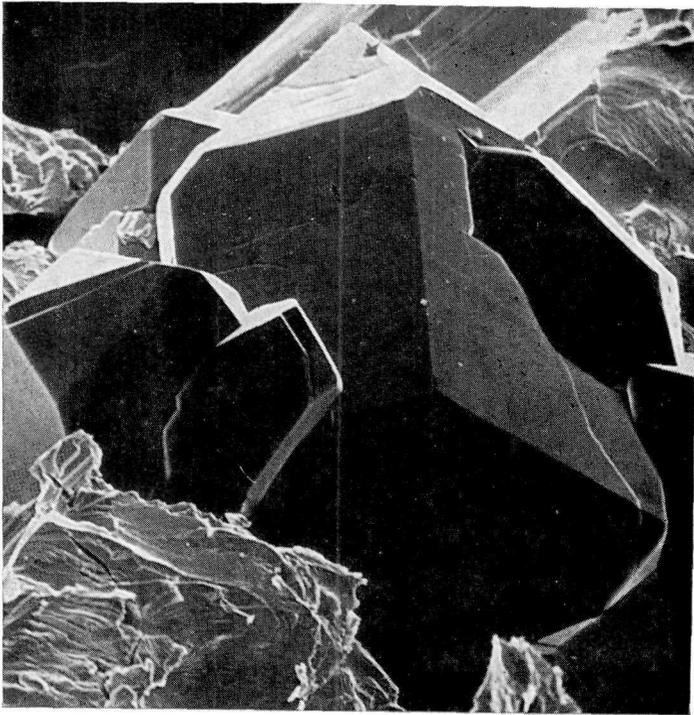
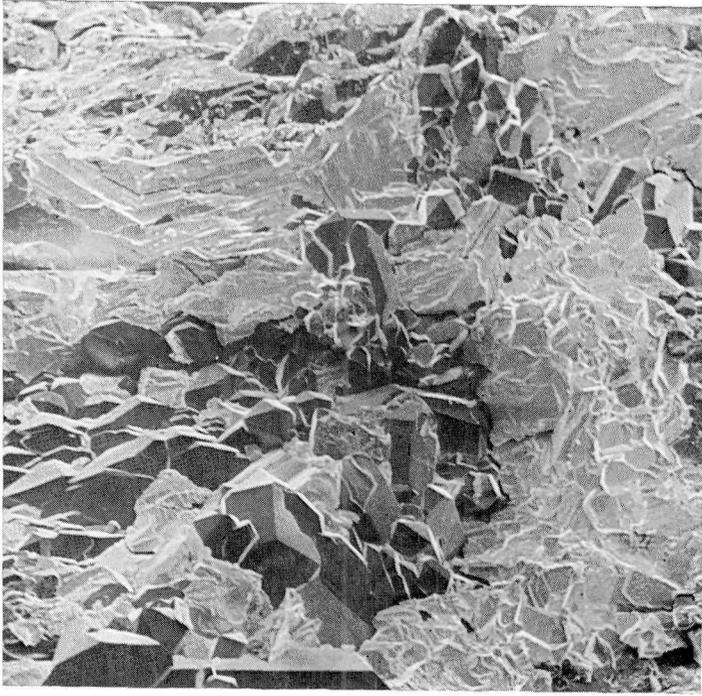


Fig. 9 ($\times 90$) Mena de Almadén: Masa laminar mineralizante de HgS que llenaba una veta. El HgS yace sobre un agregado de cristales de SiO₂. Al despegar la masa laminar de cinabrio se observaron reproducidas las huellas de los cristales de cuarzo y sus accidentes o imperfecciones superficiales.

Fig. 10a ($\times 96$) Mena de Almadén: Detalle de una superficie de rotura con agregados de cristales de cuarzo y masa de cinabrio. En el punto (A) de ésta se ha moldeado un cristal de SiO₂.

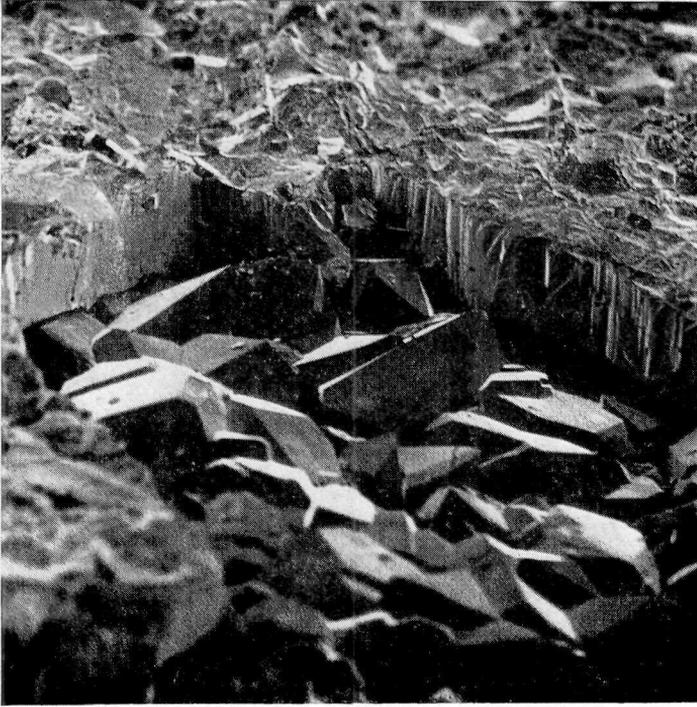


Fig. 10b ($\times 135$) Mena de Almadén: La misma zona de la micrografía anterior después de atacar cinco minutos en agua regia; obsérvese cómo en el punto A marcado en la anterior, se ha difuminado su perfil, mientras se conserva intacto el de los cristales de SiO_2 .

Fig. 10c ($\times 123$) Mena de Almadén: La misma zona recogida en las micrografías anteriores, después de 45 minutos de ataque con agua regia. Ha desaparecido la huella del cinabrio por disolución, mientras permanecen intactos los verdaderos cristales de cuarzo.

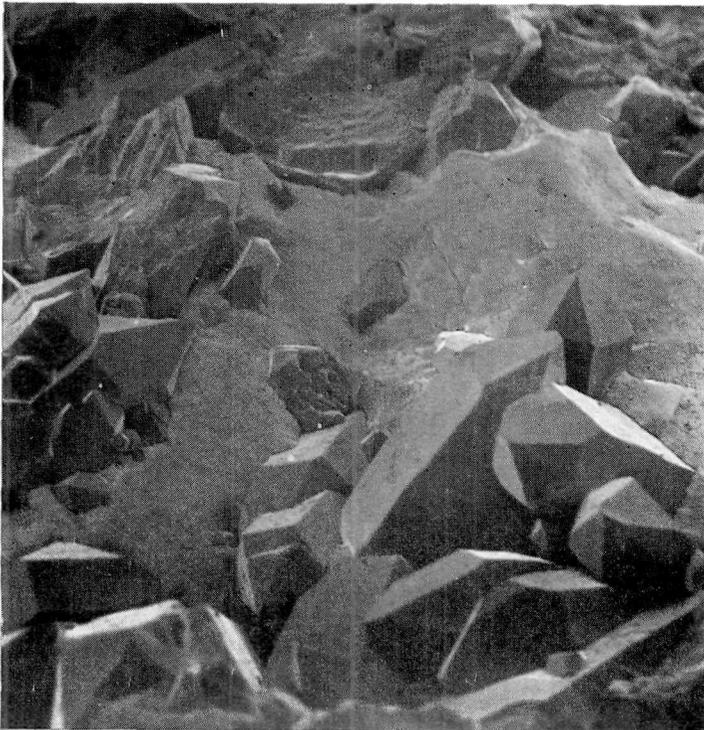
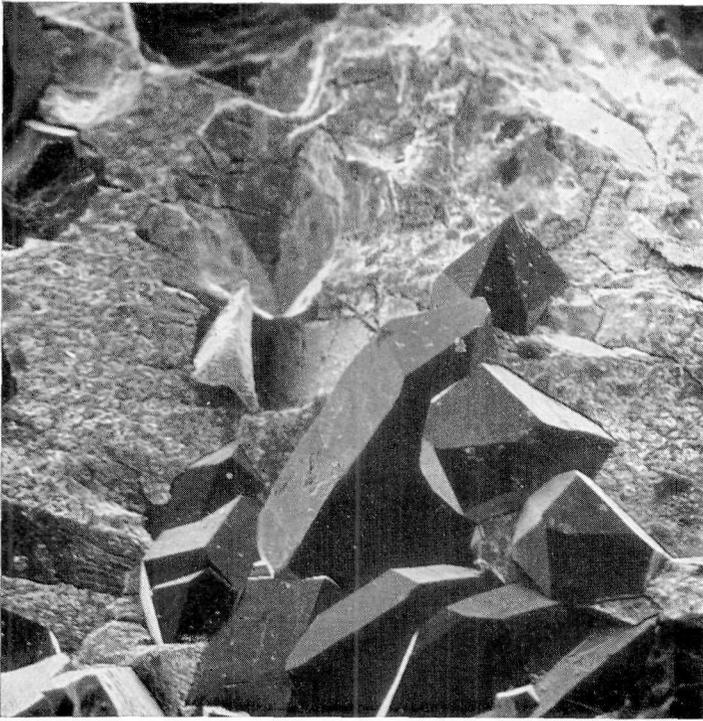


Fig. 11a y b ($\times 180$) Mena de Almadén: Superficies de fractura mutuamente correspondientes.

(a) Molde formado por un agregado de cristales de cuarzo, con algún pequeño resto de HgS retenido.

(b) Masa de cinabrio moldeada sobre el agregado de cristales reproducidos en la micrografía (a). Compruébese la correspondencia de ambas superficies siguiéndose los planos y detalles marcados.

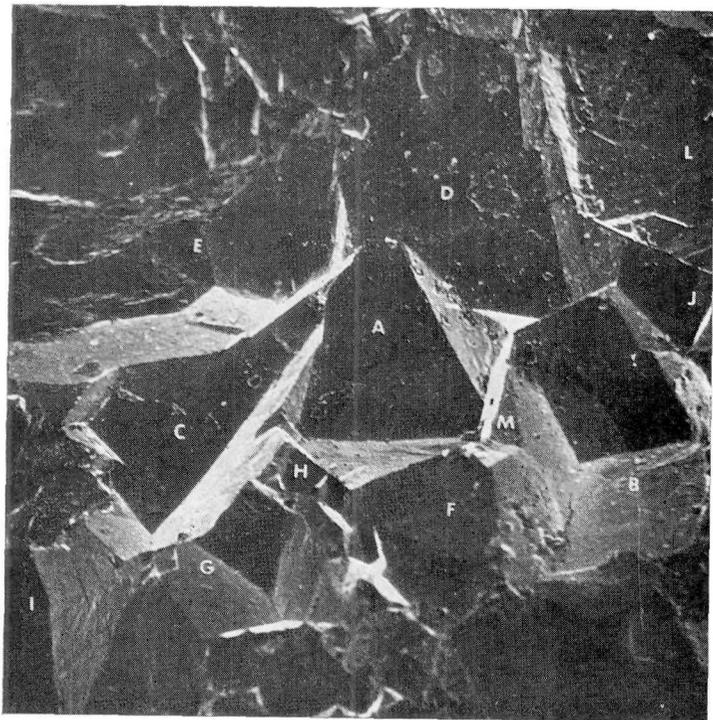
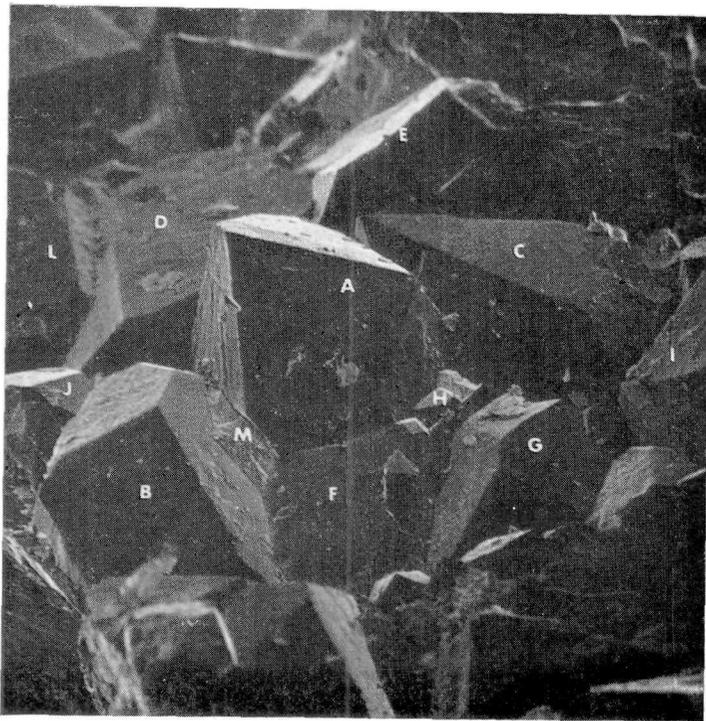


Fig. 12a ($\times 160$) y b ($\times 210$) Mena de Almadén: Superficies de fractura mutuamente correspondientes.

(a) Detalle de algunos cristales de cuarzo.

(b) Detalle de sus correspondientes huellas sobre el cinabrio. Obsérvese siguiendo las marcas puestas al efecto, la precisión del moldeo.

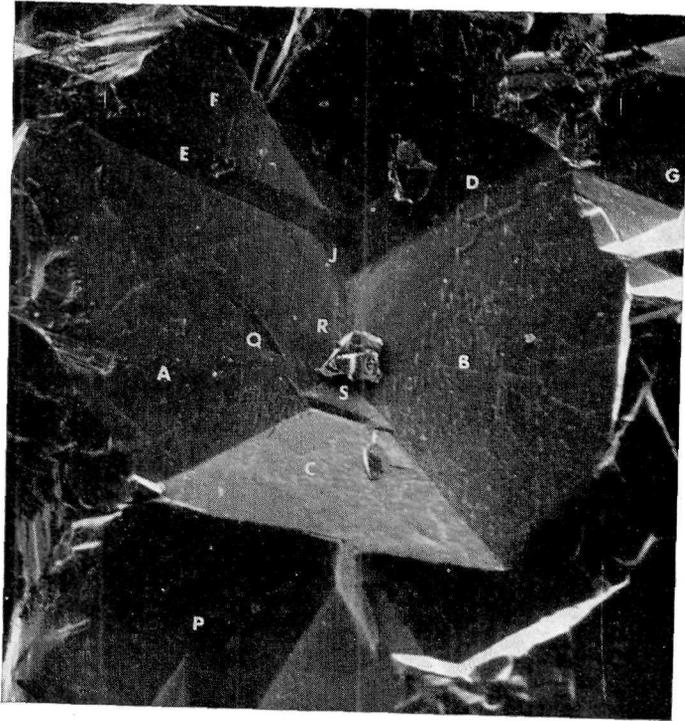


Fig. 13 ($\times 70$) Mena de Almadén: Mercurio metálico observable sobre la superficie de rotura de una masa de cinabrio.

Fig. 14 ($\times 680$) Mena de Almadén: Detalle de la anterior en la que se aprecia la gotita de mercurio alojada en una cavidad de la masa de cinabrio. Obsérvese, que en algunos puntos, la gota moja el cinabrio.

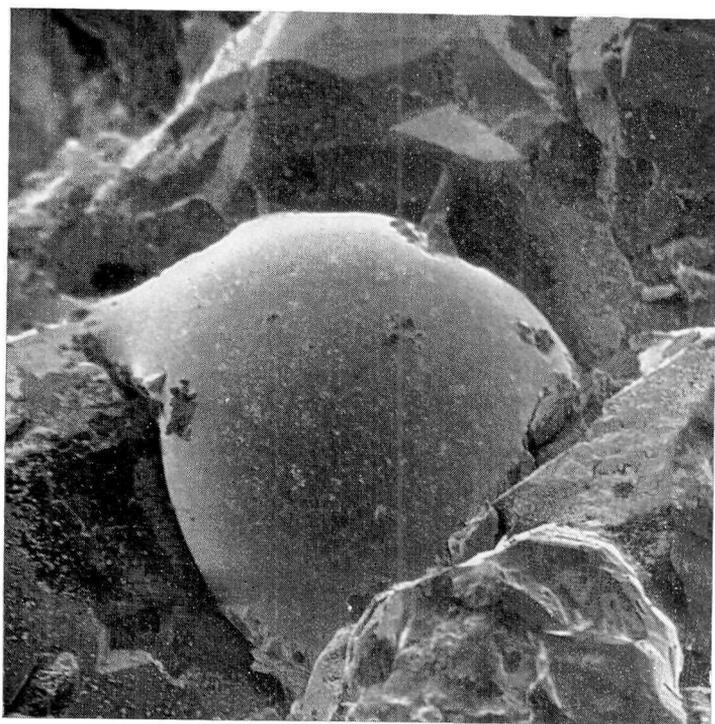
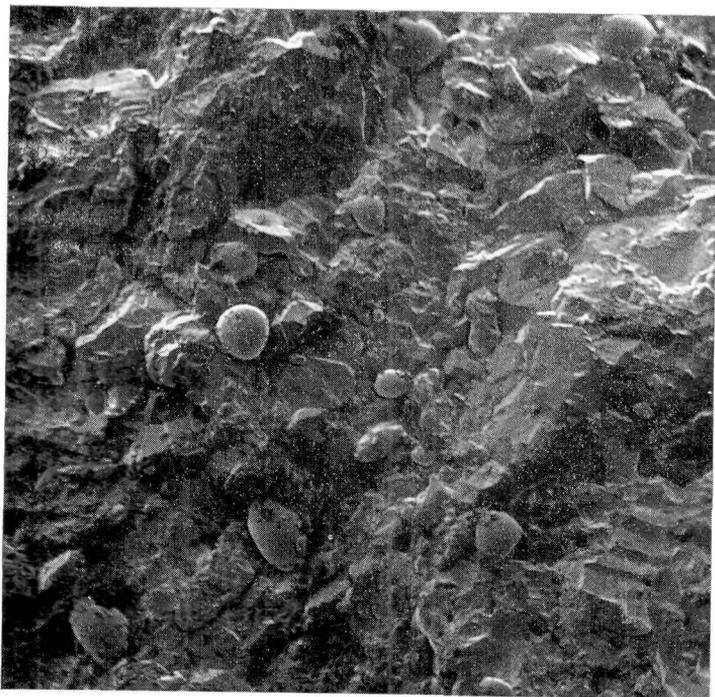


Fig. 15 ($\times 550$) Mena de Almadén: Cristales de pirita de hierro emergiendo entre cristales de cuarzo rotos.

Fig. 16 ($\times 430$) Ensayos de síntesis: Detalles de una muestra de cuarcita preparada agotando un pedazo de mena de Almadén por lixiviación del cinabrio y remineralizada por impregnación con HgS fundido. En la micrografía puede apreciarse el moldeo de los accidentes cristalográficos del cuarzo así como la fluidez del cinabrio al disponerse intercrystalinamente sobre el SiO_2 .

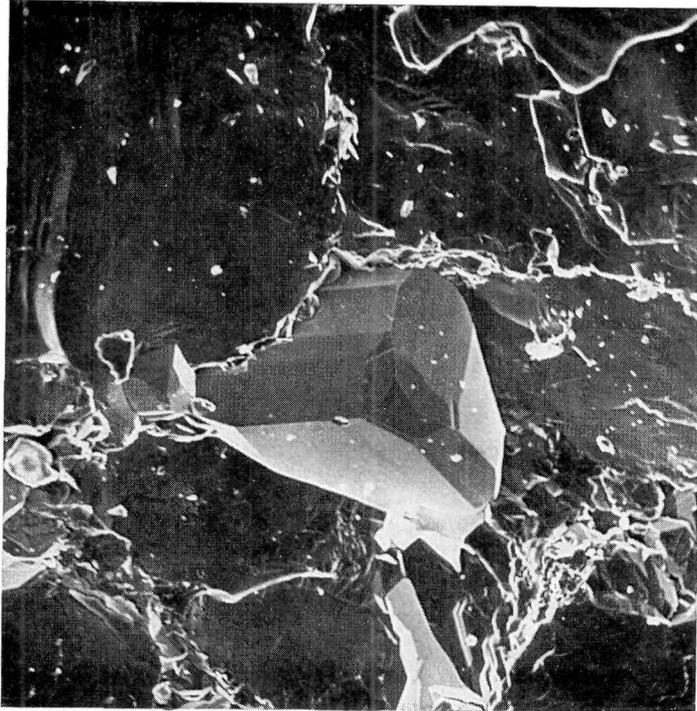


Fig. 17 ($\times 100$) Mena de Caunedo: Sorprendente mineralización del cinabrio tanto sobre cristales idiomórficos de calcita como de cuarzo. El alotriomorfismo del cinabrio sobre ambas fases es el mismo que el observado en la mena de Almadén.

Fig. 18 ($\times 2110$) Mena de Caunedo: Granos poliédricos de cinabrio en zona densamente mineralizada, no absolutamente compacta.

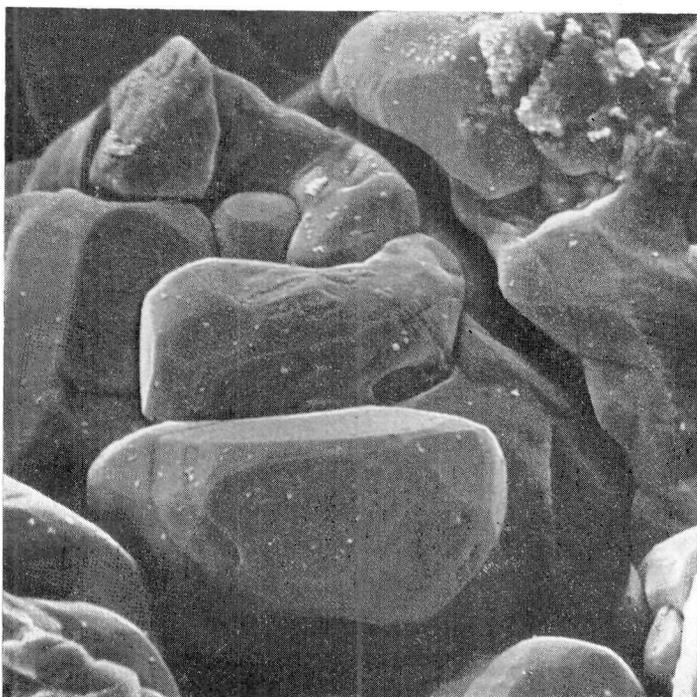


Fig. 19*a* ($\times 1243$) y *b* ($\times 1205$) Mena de Caunedo: Superficies de fractura mutuamente correspondientes. Las irregularidades superficiales contenidas en el cristal de dolomita de la figura *a*, han sido reproducidas con gran fidelidad en la huella correspondiente sobre cinabrio registrada en la figura *b*. Compruébese la correspondencia entre el cristal molde de dolomita y su reproducción sobre el cinabrio siguiendo los detalles marcados al efecto.

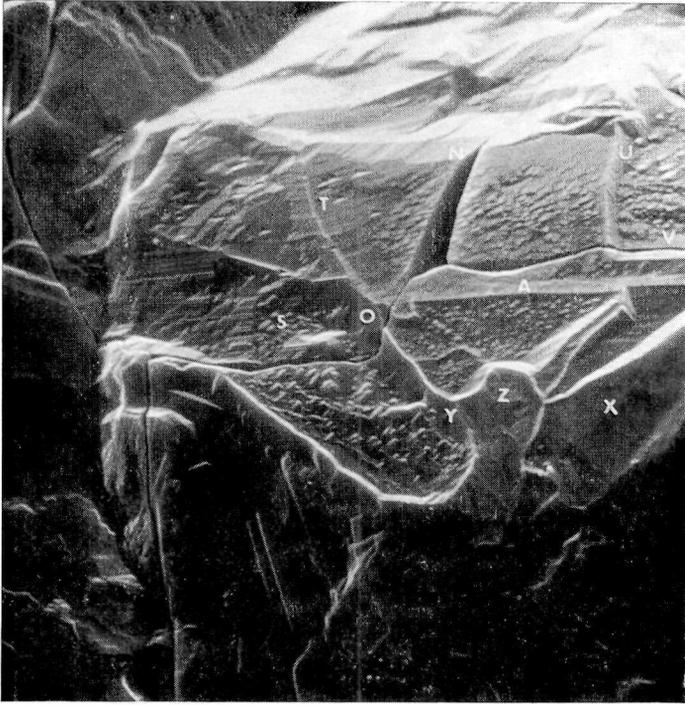


Fig. 20 ($\times 2275$) Mena de Tarna: Disposición alotriomórfica del cinabrio sobre masas irregulares de fase sílico aluminosa.

Fig. 21 ($\times 995$) Mena de Tarna: Numerosas huellas sobre el cinabrio de los cristalitos idiomórficos o no de las fases que forman la roca encajante.

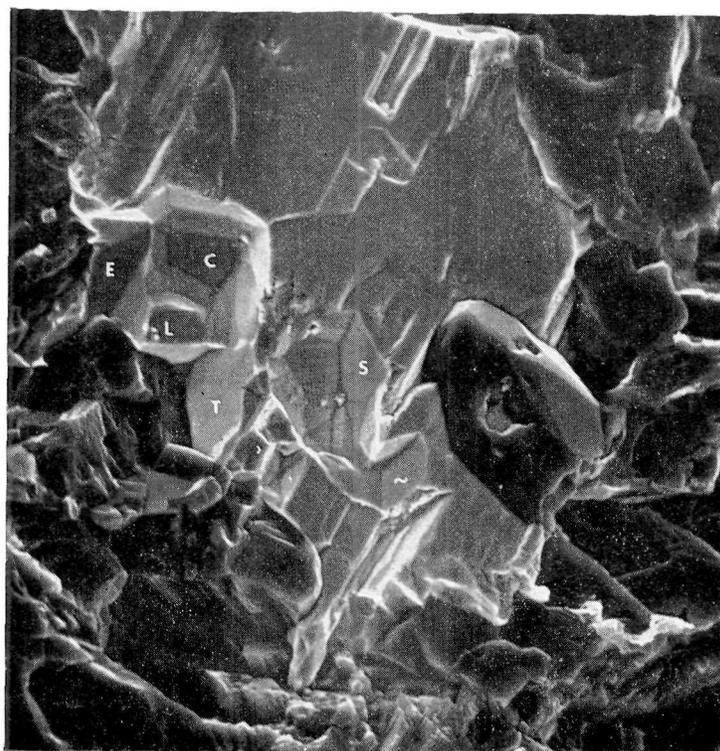
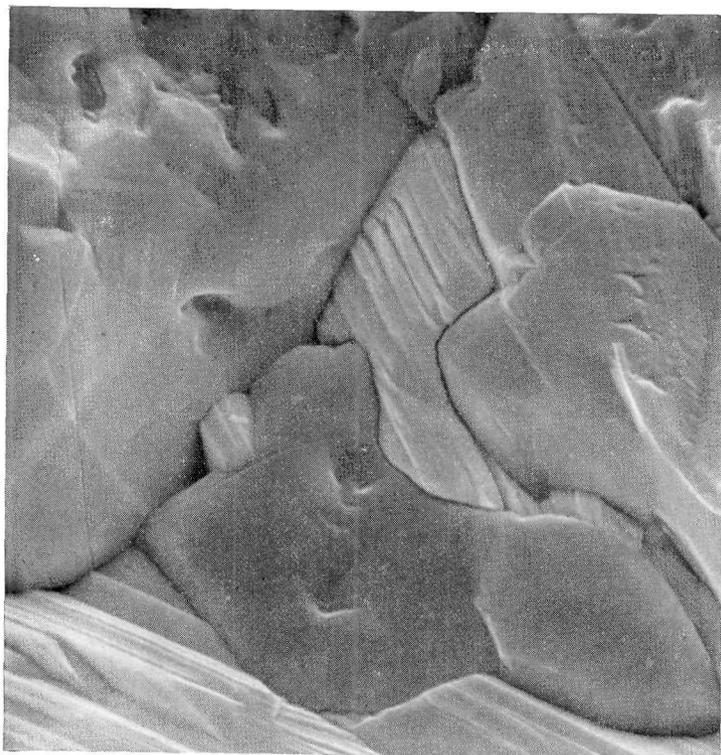


Fig. 22 ($\times 234$) Mena de Sotiel (piritas complejas): Micrografía obtenida por reflexión (campo claro). La pirita idiomórfica se presenta asociada a otros sulfuros —calcopirita (A); blenda (B); galena (C)— y sulfosales —bournonita (D)—.

Fig. 23 ($\times 400$) Mena de Sotiel: Micrografía de electrones primarios. Los cristales de arsenopirita (E) aparecen idiomórficos, distribuidos en una matriz de bournonita (D), en la que pueden verse también otras fases como blenda (B), estannita (F) y siderita (G).

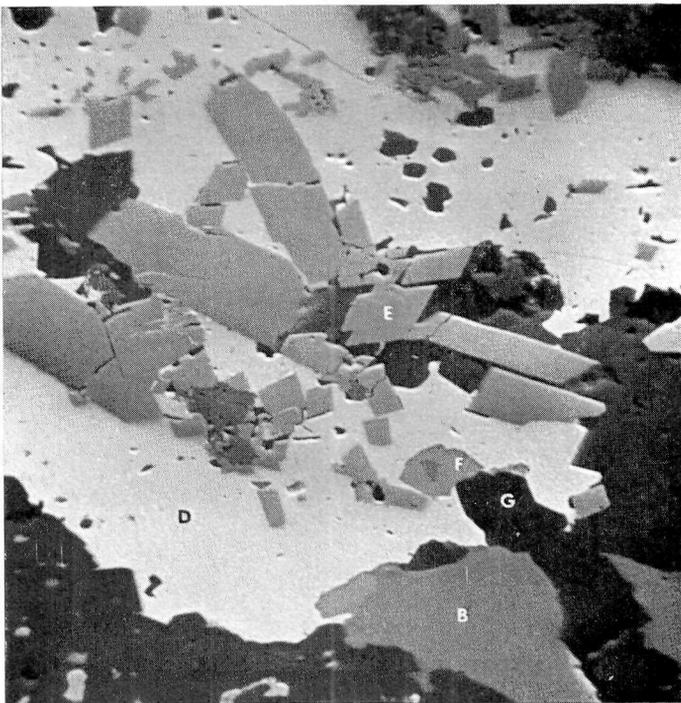
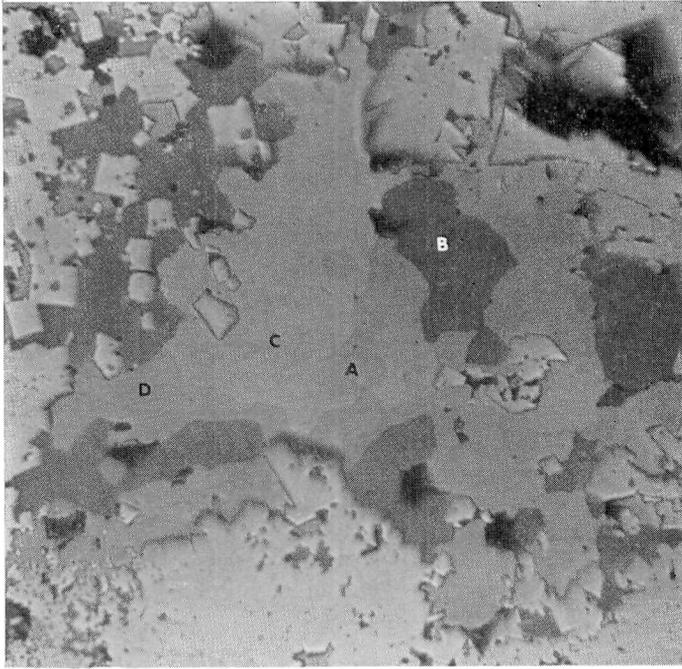


Fig. 24 ($\times 1000$) Mena de Sotiel: Micrografía obtenida por reflexión (campo claro). Los cristales idiomórficos de pirita aparecen bañados por una masa de blenda que ha ocupado, no por sustitución, incluso defectos intracristalinos. Sobre la superficie de la blenda se aprecian diminutos cristalitas de calcopirita.

Fig. 25 ($\times 2130$) Mena de Sotiel: Superficie de rotura examinada en el microscopio electrónico de barrido. Los cristales idiomórficos de pirita aparecen emergiendo de una masa de blenda.

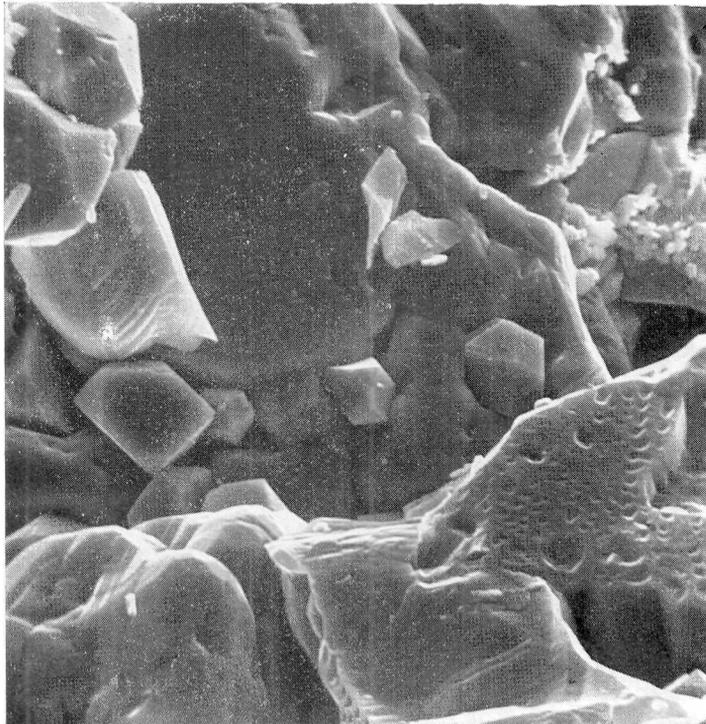
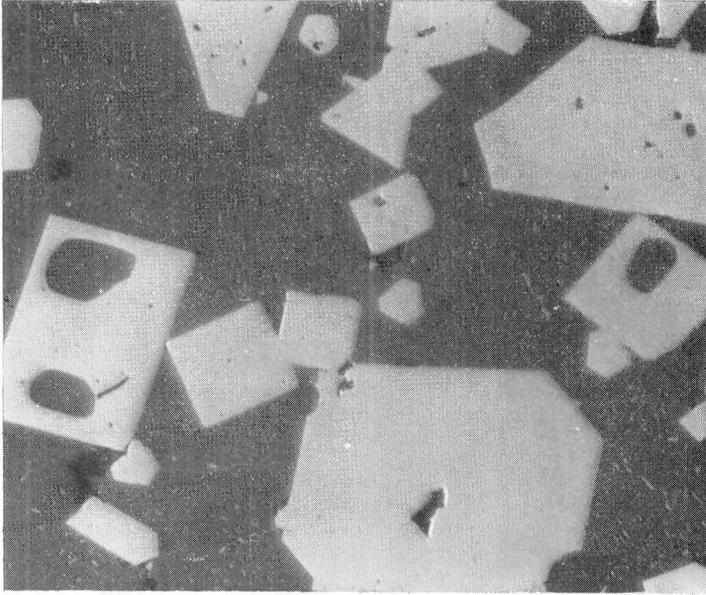


Fig. 26 ($\times 5250$) Mena de Sotiel: Cristal idiomórfico de pirita embebido en SZn. Obsérvese cómo entre ambas fases no existe ningún tipo de adherencia o cohesión.

Fig. 27a ($\times 5700$) Mena de Sotiel: Detalle de superficies en fractura.

(a) Lámina de blenda ajustada a la superficie de un cristal de pirita que emerge de la propia masa de blenda mineralizante. Obsérvese sobre la micrografía, el detalle del moldeado de las aristas.

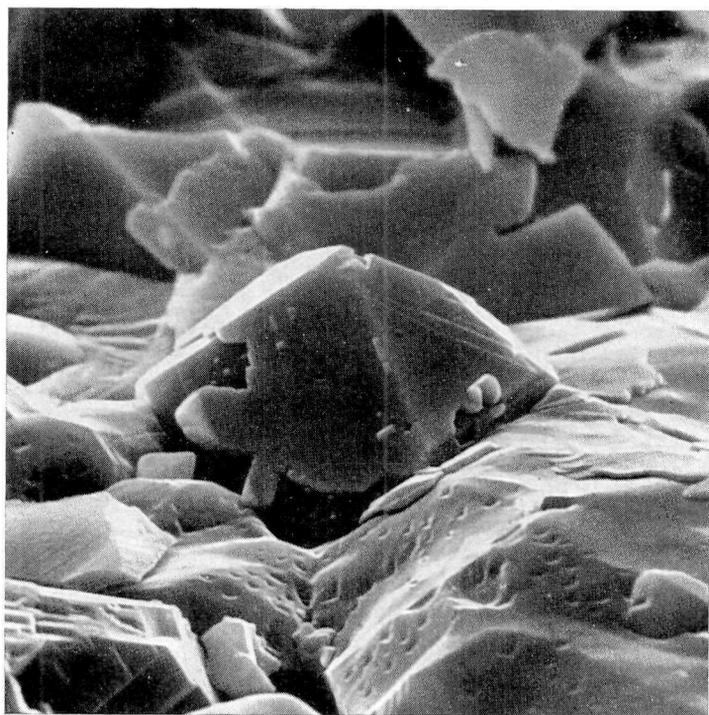
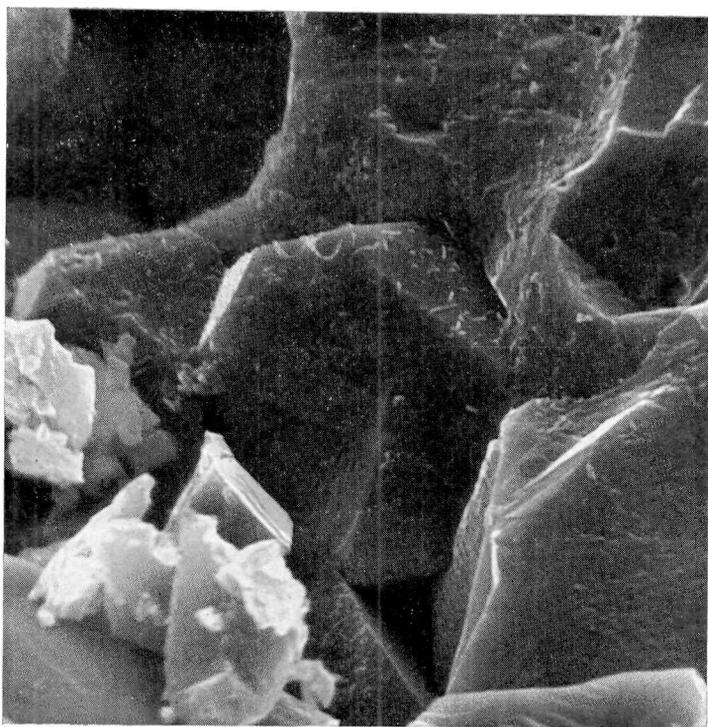


Fig. 27*b* ($\times 2250$) Cristal de pirita mineralizado por blenda. Sobre la superficie de ésta se aprecian la existencia de pequeños cristalitas de calcopirita, análogos a los que se resuelven en la micrografía *c*.

Fig. 27*c* ($\times 10700$) Cristales de calcopirita sobre blenda, y huellas que dejaron en la matriz cuando se desprendieron o partieron por efecto de la rotura.

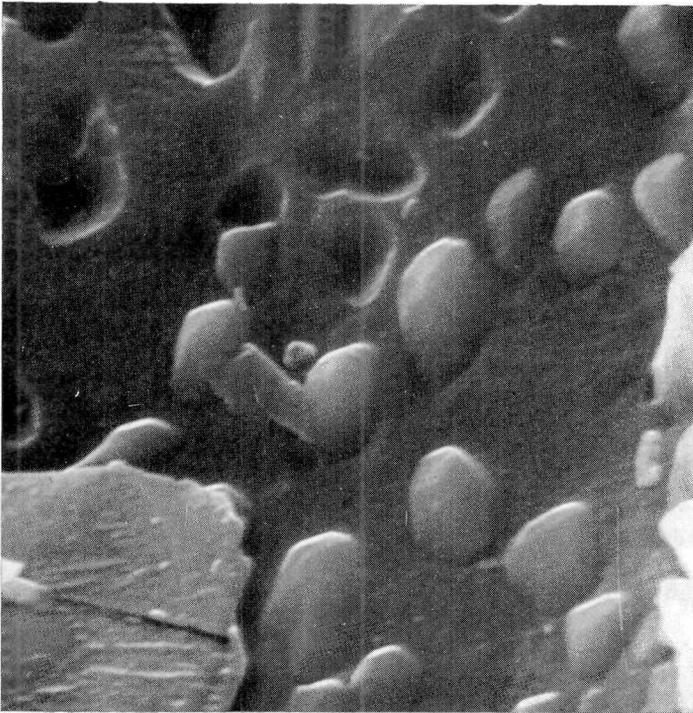
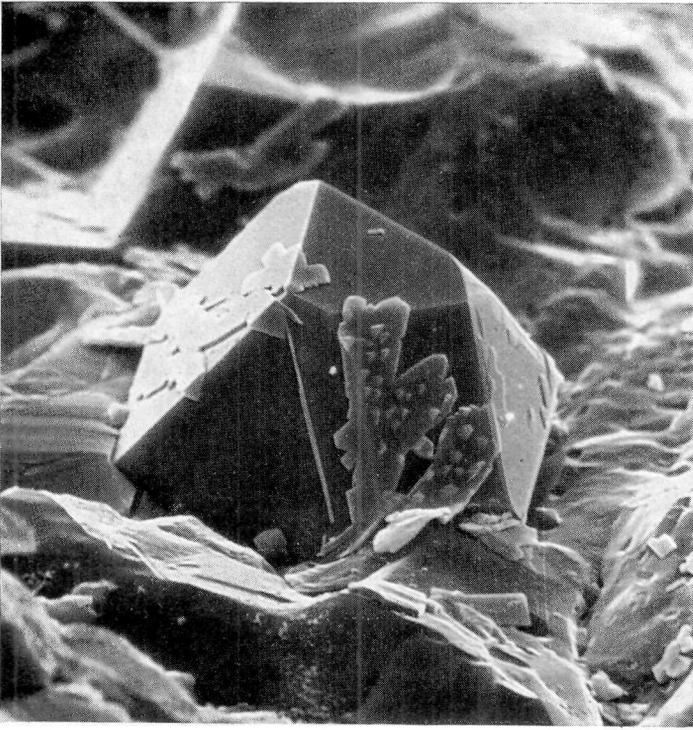


Fig. 28 ($\times 1135$) Mena de Sotiel: Masas de cristales de galena en espacios intercristalinos de pirita. Obsérvese nuevamente la falta de adherencia entre ambas fases.

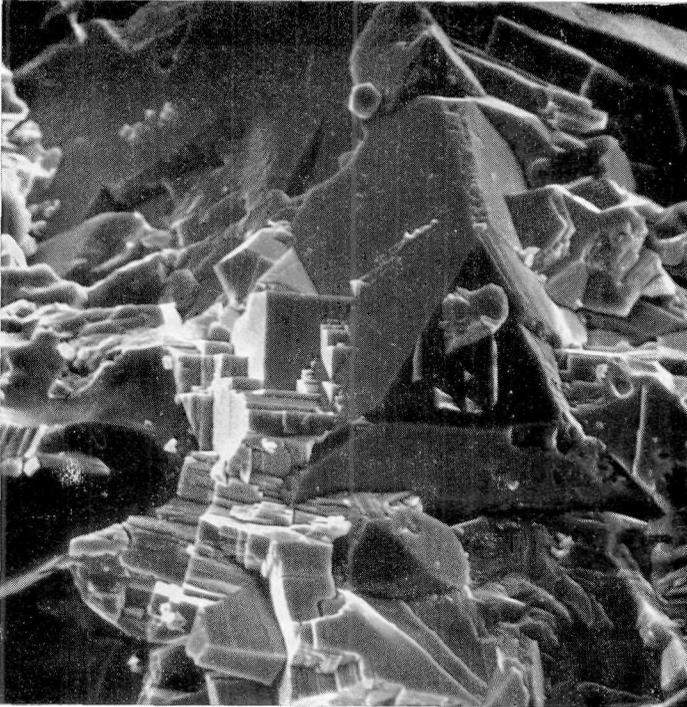


Fig. 29 ($\times 2200$) Mena de Sotiel: Huellas de cristales de pirita moldeados por la masa de blenda. Al lado de la huella hay un cristal idiomórfico de pirita que ha quedado adherido a la matriz de la blenda.

Fig. 30 ($\times 1175$) Mena de Sotiel: Masa de blenda que ha moldeado un agregado de cristales de galena.

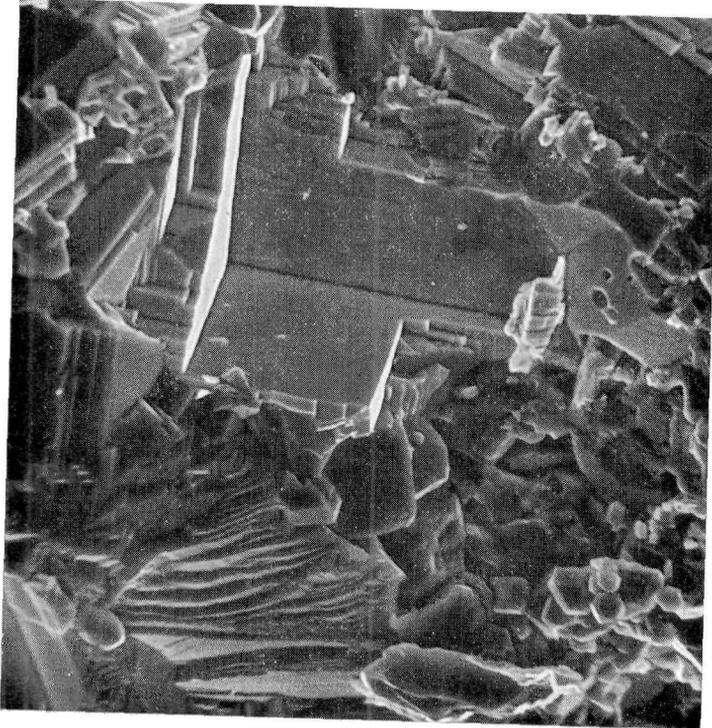
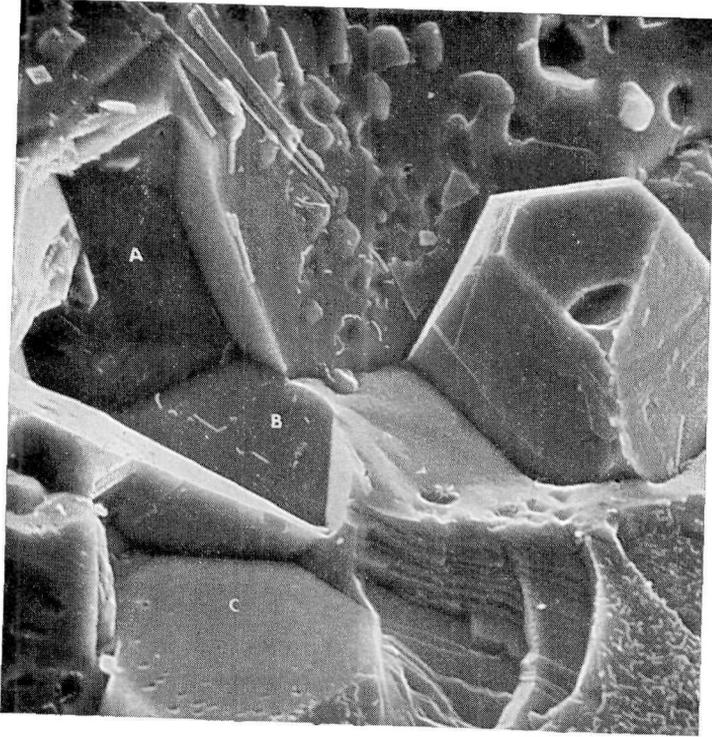
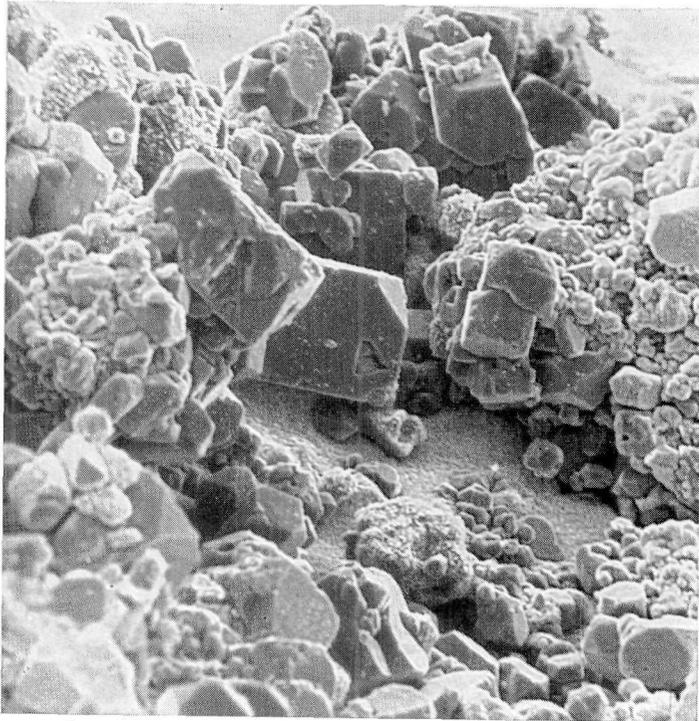
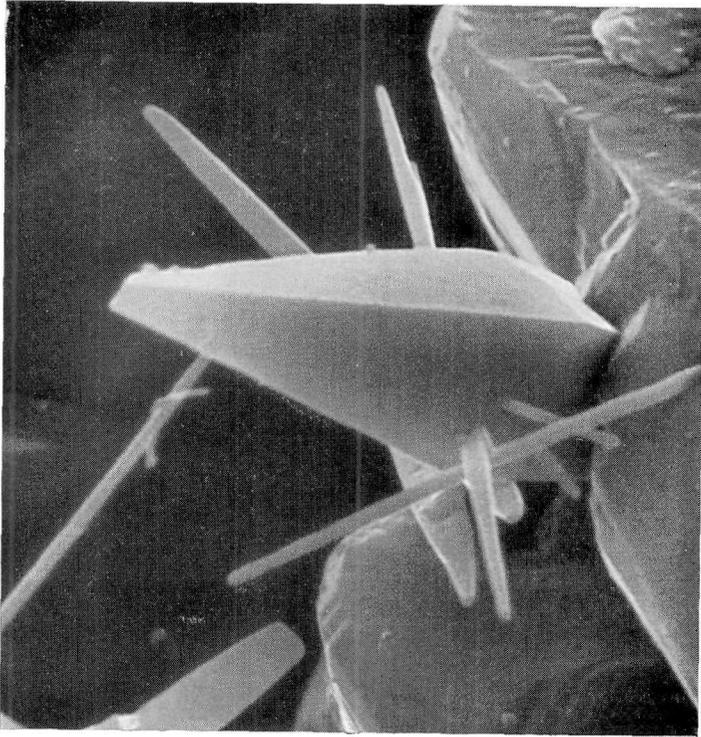


Fig. 31 ($\times 10900$) Mena de Sotiel: Cristal idiomórfico de arsenopirita.

Fig. 32 ($\times 465$) Mena de Sotiel: Efectos del ataque de la blenda durante cinco minutos, con ClH concentrado a 100° C. Los cristales de pirita no atacados forman una especie de esqueleto y presentan abundantes defectos.



DISCURSO DE CONTESTACION

DEL

EXCMO. SR. D. FLORENCIO BUSTINZA LACHIONDO

Excmo. Sr. Presidente,
Excmos. Sres. Académicos,
Señoras y señores:

Rindo culto fervoroso a la Amistad y por eso he aceptado con gran complacencia el encargo honroso de contestar, en nombre de esta Real Academia de Ciencias, al magnífico discurso que acabamos de escuchar de mi buen amigo el Prof. Dr. Felipe Calvo y Calvo. Y ¡qué bello! y ¡qué emotivo! en la parte que ha dedicado al recuerdo y estudio de su Maestro D. Emilio Jimeno, a quien todos estimábamos por su gran valía científica y por sus excelsas cualidades humanas. Y al escribir estas líneas me viene a la mente un pensamiento de Séneca: *Nihil esse grato animo honestius, Nada es más hermoso que un corazón agradecido*, y yo agrego especialmente cuando se trata de la gratitud de *un discípulo para con su Maestro*.

Como es protocolario, en la primera parte de mi trabajo analizaré la obra científica, cultural y docente del beneficiario, y en la segunda parte haré un breve comentario sobre el tema de su discurso.

A pesar de lo que obliga la amistad, a lo largo de mi exposición he tenido en todo momento presente la sentencia clásica: *Amicus Plato, Amicus Socrates, Sed Major Veritas*, Platón es mi amigo, Sócrates es mi amigo, pero lo es más la verdad.

Nació D. Felipe Angel Calvo y Calvo el 2 de octubre de 1919 en la capital de esa noble tierra palentina, del heroísmo de cuyos hijos la Historia registra muchos hechos brillantes. Y no olvidemos que fue en Palencia donde funcionó en tiempos del rey Alfonso VIII, en el siglo XIII, el llamado *Estudio de Palencia* o *Estudio General de Castilla*, centro cultural que brilló a gran altura y que se considera como la Universidad más antigua de España, destacando entre sus alumnos el que llegó a ser gran Santo Español, *Domingo de Guzmán*, fundador de la Orden de Predicadores.

Sus padres D. Elpidio y D.^a María, ambos Maestros Nacionales en Palencia, de los que recibió las primeras enseñanzas de un magisterio ejemplar, fértil, que tanto influyó en su educación y en sus características humanas, que andando los años y con su propio esfuerzo le llevarían a los puestos que analizaré y a la dignidad con que hoy es recibido en esta Real Academia de Ciencias.

Desde la Escuela Nacional que regentaba su padre pasó al Instituto Nacional de Segunda Enseñanza de Palencia, donde en los años 1931-37 cursó brillantemente el Bachillerato. Por decisión de don Elpidio no siguió los cursos intensivos en la Universidad sino que en 1940 empezó con un curso normal la carrera de Ciencias Químicas en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid, de la que fue Becario.

Por concurso de méritos obtuvo plaza como estudiante para cursar el Doctorado en Química Industrial de reciente creación y fue nombrado Ayudante de Clases Prácticas adscrito a la Asignatura de Metalurgia y Metalografía del Doctorado.

Convocada a oposición la Cátedra de Física y Química del Instituto de Palencia se preparó para ella, pero poco antes de la fecha del comienzo de los ejercicios un infiltrado pulmonar le obligó por prescripción médica a guardar reposo y a interrumpir su preparación.

El lo explica así:

Creo que el proceso psicológico de este incidente de mi vida, tiene en el temple metalúrgico el símil más adecuado: del calor de la preposición, pasé al frío incierto de un reposo entre montañas con toda la secuela íntima —tensiones internas— que es fácil imaginar. Siguió después el «revenido» de penosas experiencias en mis primeras gestiones para poder empezar a trabajar, todas infructuosas, hasta que el Patronato «Juan de la Cierva», al frente del cual estaba uno de mis maestros universitarios, me dio la oportunidad que buscaba concediéndome una beca para participar en un Cursillo de Iniciación a la Investigación en Soldadura, que dirigió el profesor Matting.

Al terminar ese Cursillo fue nombrado Colaborador del Instituto de la Soldadura iniciando así el día 1.º de septiembre de 1950 su vida profesional.

En el Instituto de la Soldadura recibió el encargo de crear la Revista de la especialidad. Y no le fue fácil dicha empresa porque la idea que él tenía —y que, por fin, le dejaron desarrollar— suponía

una nueva concepción de este tipo de publicaciones con el propósito de darles mayor utilidad. La bautizó con el título de *Ciencia y Técnica de la Soldadura* y ha publicado en ella buen número de sus trabajos.

Cumplido dicho encargo solicitó pasar al Laboratorio, donde empezó a familiarizarse con las técnicas metalográficas que ya no había de abandonar, a la vez que se iniciaba en lo que iba a ser preocupación principal de su vida profesional: las implicaciones metalúrgicas de los procesos empleados en soldadura.

Fruto de aquellos balbuceos fue su primer trabajo, que, publicado con el título *Nuevas posibilidades de la macro y micrografía en la investigación en soldadura*, mereció la felicitación del profesor Portevin (gran figura de la Metalurgia francesa), y algunas de las macro y microfotografías que en dicho trabajo aparecieron se siguen reproduciendo en publicaciones de todo tipo. Los especialistas en soldadura trataban por entonces de definir una supuesta propiedad de los metales llamada *soldabilidad*. Pensando seriamente en ella antes de continuar con sus trabajos, llegó a la conclusión de que valía la pena de hacer una revisión de su concepto y con ese título de *Revisión del concepto de soldabilidad* publicó su segundo trabajo. En él, después de demostrar la inexistencia de una tal *propiedad*, proponía, entre otras cosas, que, en vista de ello, se cambiara el nombre de *Comisión de Soldabilidad del Instituto Internacional de la Soldadura*. Y en efecto, esa Comisión fue oportunamente «confirmada» con el nombre de *Comportamiento de los metales frente a la soldadura*, que es fundamentalmente distinto. Y las ideas expuestas por Calvo fueron también aceptadas por profesionales más o menos ajenos al Instituto Internacional.

Abundando en la inexistencia de tal propiedad, tuvo la feliz idea de proponer una *probeta propia* en un campo donde ya existían no menos de 160 ensayos diferentes y precisamente por ello. Con la *probeta en cuña* que Calvo proponía no pretendía naturalmente medir una propiedad cuya inexistencia había demostrado, sino tratar de definir los aceros con respecto a su soldadura eléctrica por arco, que es distinto.

Investigando en este tema le sorprendió la concesión de una beca del *British Council* para poder trabajar en Cambridge como *Research Student* en el Departamento de Metalurgia de su Universidad del que era director el profesor Austin. Y en octubre de 1952 llevó con-

sigo a Cambridge la idea de la «probeta en cuña», en cuyo desarrollo se aprestaron a ayudarle tanto el profesor Austin como la *British Welding Research Association*, la empresa *Murex* y el *Lloyd's Register of Shipping*. No obstante, consciente Calvo de su insuficiente formación metalúrgica rogó al profesor Austin que le permitiera seguir los cursos normales del Departamento e iniciar un trabajo de investigación más formativo. El profesor accedió y bajo la supervisión del Dr. J. Nutting empezó a trabajar sobre la relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas de los aceros suaves.

Al terminar el primer año de la beca, el profesor Austin solicitó y obtuvo del *British Council* su extensión por un segundo año y le inscribió como candidato al Grado de Doctor por aquella Universidad.

Consumida también dicha prórroga, el profesor Austin se dirigió a nuestro C. S. I. C., al cual pertenecía Calvo como Colaborador, para que autorizase a nuestro compatriota a continuar un tercer año en Cambridge para que, a la vez que terminaba su tesis, cumplir con el requisito de tres años de residencia, de escolaridad, exigido por aquella Universidad para poder optar al Grado de Doctor, con la advertencia de que su Departamento se haría cargo de todos los gastos. El C. S. I. C. no accedió a la propuesta del profesor Austin y Calvo tuvo que regresar a Madrid. Pero el profesor Austin, que había sabido calibrar toda la valía de nuestro compatriota, buscó en las *Regulations* de aquella Universidad si había alguna previsión para un casi así y halló que, excepcionalmente, el Senado de la Universidad de Cambridge puede conceder a un candidato a Ph. D. que pueda hacer su tercer año de Residencia en su país de origen, siempre que allí fuera dirigido en sus investigaciones por un profesor de reconocido prestigio internacional y que fuese aceptado por el *Board of Research Studies*. Afortunadamente el profesor E. Jimeno, que había de continuar la dirección de las investigaciones en España, era bien conocido por el profesor Emeleus, titular de Química Inorgánica en Cambridge, y la propuesta del profesor Austin fue aceptada por el Board.

En septiembre de 1956 presentó Calvo su tesis doctoral en Cambridge. Pero faltaba para ultimar el expediente del Ph. D. por Cambridge el requisito del examen oral. Se nombró al efecto un tribunal constituido por el profesor Austin y un *external examiner* que sería el profesor Jimeno y el acto debería celebrarse en Cam-

bridge, pero el profesor Austin estimando que para el profesor Jimeno sería penoso trasladarse a Inglaterra propuso y obtuvo del *Board of Research Studies* una nueva excepción: el que dicho acto se celebrara en España y, en efecto, se realizó en los locales del Instituto de la Soldadura del C. S. I. C. al que acudió Calvo revestido con la toga de la Universidad de Cambridge, y el 15 de junio de 1957 recibió en Cambridge personalmente, solemnemente, la investidura de *Doctor of Philosophy*, dándose la circunstancia de que fue el primer grado de Doctor que se concedía a un español en dicha famosa Universidad.

Desde entonces quedó el Dr. Calvo íntimamente vinculado al profesor Austin, a su Departamento de Metalurgia y al Welding Institute.

La tesis doctoral de nuestro recipiendario llevaba por título *The Microstructure and Mechanical Properties of Low and Medium Carbon Steels*. En ella se estudian las propiedades de dureza, tracción y resistencia en tres tipos de acero, cuya microestructura se modificó por tratamientos de temple y revenido a varias temperaturas y durante tiempos diferentes. Los ensayos los hizo a temperatura ambiente y a las del oxígeno o nitrógeno líquidos. El análisis estadístico de los resultados le permitió establecer que el incremento de la dureza, del límite elástico y de las cargas de rotura que los aceros experimentan al pasar de la temperatura ambiente a las del oxígeno o nitrógeno líquidos, es una cantidad constante para cada propiedad, e independiente del acero considerado y del valor inicial de esa propiedad, es decir, de la microestructura. Los aceros al carbono, pues, se comportan como si fuesen aleaciones monofásicas ferríticas, por lo que se refiere al efecto de la disminución de la temperatura de ensayo sobre sus propiedades mecánicas.

Esta tesis fue seleccionada por *Micro-Methods Ltd.* para su reproducción.

Cuando regresó de Inglaterra en 1954 y en vista del gran interés que entre los metalúrgicos de dicho país había despertado su *probeta en cuña*, continuó sus interrumpidos trabajos sobre ella y una vez ultimado y con el título de *Probeta en cuña para la definición de un acero con respecto a su soldadura eléctrica por arco*, la presentó en octubre de 1955 en nuestra Facultad de Ciencias como tesis doctoral en Química Industrial y mereció el Premio Extraordinario. Con la *probeta en forma de cuña* se logra que el acero ponga de mani-

fiesto sus características de templabilidad, frente al proceso de soldadura eléctrica por arco, en la zona afectada por el calor, e investigando las estructuras en esa zona, descubrió, identificó e interpretó unas *lagunas de martensita* que, para ciertos ciclos térmicos, aparecen en las colonias perlíticas de la zona de transición, entre el material de base y la zona afectada. Y esas *lagunas* le dieron la pauta para establecer, en trabajos posteriores, el mecanismo de las transformaciones en tan compleja zona de las soldaduras.

La *probeta en cuña* del Dr. Calvo tuvo un gran éxito y empezaron a utilizarla en algunas acerías belgas y en muchos centros de investigación. El profesor Kihara y colaboradores, en la Universidad de Tokio, la emplearon para estudiar el endurecimiento en aceros de alta resistencia y predecir las condiciones óptimas para su soldadura. En la U. R. S. S. Krasulin y Shorshorov la han empleado para medir los efectos de la velocidad de enfriamiento sobre la poligonización en soldaduras de estructura monofásica. En la British Welding Research Association la vienen empleando y han reconocido que una sola probeta en cuña proporciona la misma información que cinco o seis probetas CTS (*Control Thermal Severity*) desarrollada por dicha institución.

A consecuencia de estos éxitos el Dr. Calvo fue invitado por la Technische Hochschule de Hannover y la Deutschen Verbendes fur Schweisstechnik, para exponer sus trabajos en el Institut für Werkstoffkunde de Hannover, donde dio dos conferencias y otra en Bremen. El profesor Matting, director del Instituto de los Materiales en Hannover, escribió después al de la Soldadura en Madrid: *Calvo ha tenido en Hannover un éxito completo..., dándonos cuenta de los extraordinarios resultados obtenidos en su tesis... puedo asegurarle que nos ha proporcionado muchas sugerencias... La parte oral se verificó de una manera impresionante... Felicitaciones a Vd. y al Instituto.* También la prensa técnica alemana y la suiza se hicieron eco de esas conferencias con gran extensión y en los términos más efusivos.

Más adelante la revista «Schweissen u. Schneiden» le pidió un artículo sobre el mismo tema con el título *Versuche zur Bestimmung der Schweissbarkeit von Stählen*; se publicó en su número 7 del año 1960, y por el cual le fue concedido por la *Deutscher Verband für Schweisstechnik* el premio correspondiente al citado año.

El tema de las implicaciones metalúrgicas del proceso de la sol-

dadura seguía siendo su principal línea de trabajo, y, con ocasión de la Asamblea Nacional del Instituto de la Soldadura celebrada en Barcelona en octubre de 1957, dio a conocer los primeros resultados obtenidos con una nueva técnica que estaba desarrollando para poder establecer definitivamente el mecanismo de las transformaciones en la zona afectada por el calor. A dicha técnica se la bautizó con el nombre de *Técnica de la Superficie Pulida* (T S P) y con ello logró, por primera vez en el mundo, referir una determinada microestructura de la zona afectada por el calor, a la microestructura original en el mismo punto.

En la *British Welding Research Association* de Inglaterra apreciaron bien pronto las grandes posibilidades de dicha nueva técnica y le invitaron al Dr. Calvo a un coloquio. Pocas semanas después de de su visita, el Dr. Weck, director de la B. W. R. A., que conocía la preparación, el entusiasmo y el valor de las investigaciones del Dr. Calvo le ofreció un contrato por tiempo indefinido como *Principal Research Officer* en los laboratorios de dicha institución en Abington Hall —cerca de Cambridge—, a donde se trasladó en enero de 1959 y donde siguió investigando y tuvo ocasión de ser el primero en aplicar la microscopía electrónica al estudio de las transformaciones en la zona afectada por el calor en aceros. Calvo iba cobrando cada día más interés por los problemas metalúrgicos generales aparte de los específicos de la soldadura.

En el mes de julio de 1959 celebró la B. W. R. A. un *Open Day* que le dio la oportunidad de presentar a sus miembros los resultados obtenidos hasta entonces, y como consecuencia de ello el *Central Electricity Generating Board* firmó un contrato con dicha Asociación, que importaba 5.000 libras anuales durante tres años para, utilizando la técnica del Dr. Calvo, investigar el comportamiento frente a ciclos térmicos rápidos de los aceros que Inglaterra proyectaba emplear en la construcción de reactores nucleares de potencia, y por otra parte el *Electricity Board*, ante la elocuencia de las microfotografías electrónicas obtenidas por Calvo, decidió adquirir el primer microscopio electrónico de la Asociación.

La muerte de D. Elpidio le sorprendió en aquel exilio profesional voluntario y la pena que le produjo la pérdida de su padre iluminó el camino de su regreso.

Cuando desde España se le preguntó al director del B. W. R. A. ¿qué había hecho el Dr. Calvo allí? contestó de la siguiente forma con un documento cuya traducción dice así:

A quien pueda interesar:

El Dr. Felipe Angel Calvo Calvo trabajó desde enero a noviembre de 1959 como "Principal Scientific Officer" en el Laboratorio de Metalurgia de la Asociación.

Durante este tiempo inició una línea de investigación completamente nueva en la metalografía de las zonas afectadas por el calor en las soldaduras. Tuvo un científico y un "Experimental Officer" como ayudantes, y aunque su permanencia en la Asociación fue muy corta, llegó a abrir con nuevas técnicas un nuevo camino en este problema. A pesar de que tuvo que dejar su trabajo y volver a España por razones familiares, lo por él realizado despertó enorme interés en este país, y será continuado en la misma línea por sus ayudantes.

El Dr. Calvo nos impresionó particularmente por su entusiasmo, iniciativa, capacidad de dirección y energía sin límites. Supuso un gran estímulo para todos sus colegas y fue muy útil en otros aspectos. Concretamente señaló deficiencias en nuestros sistemas de pulido y otras técnicas, que corregimos siguiendo sus sugerencias. Quiero ensalzar de forma especial su trabajo metalográfico. Las microfotografías que él obtuvo de zonas afectadas por el calor, tanto por microscopía óptica como electrónica, son de sobresaliente calidad. Yo diría que hoy en día no se produce nada mejor en ninguna parte del mundo, y fundamento esta opinión en lo que vi en la exposición que visité en Cleveland, Ohio, celebrada con motivo del concurso que sobre micrografías metalúrgicas convocó la "American Society for Metals", en 1958.

Considero al Dr. Calvo como uno de los primeros metalurgistas de la soldadura del mundo. Firmado RICHARD WECK.

Y no estará de más que yo señale que el B. W. R. A., hoy *Welding Institute*, es el Centro de Investigación en Soldadura de más prestigio en el mundo.

De regreso a España redactó el trabajo titulado *Estudios sobre metalurgia de la soldadura del acero*, con los resultados obtenidos durante la breve pero fecunda temporada en *Abington Hall* y relacionándolos con sus experiencias anteriores sobre el tema. Por ese trabajo se le concedió el premio Torrado Varela convocado por *ATEEM* para 1960, y fue publicado casi simultáneamente en «Ciencia y Técnica de la Soldadura» y en «Técnica Metalúrgica» en 1962.

En marzo de 1963 la *British Welding Research Association* publi-

có la versión inglesa de dicho trabajo con el título *Studies of the Welding Metallurgy of the Steels*, en colaboración con K. P. Beatley y R. G. Baker, y el director de investigación de la *British Welding Research Association*, Dr. R. Weck, escribió la introducción en la que se lee lo que sigue: *The work itself is the happy result of the collaboration of two englishmen with Dr. Calvo a spaniard whom we were happy to have with us at B. W. R. A. for a year, and whose boundless enthusiasm and devotion was largely responsible for getting the work off to a good start.*

En enero de 1963 se publicó en «The Metallurgist» —la revista de la Institución de Metalurgistas— un artículo de Calvo, *Metallurgy in Spain*, que tuvo gran resonancia entre los especialistas y prueba de ello es la carta que el día 2 de abril de 1963 escribió el Dr. L. H. Callender al profesor P. G. Dawson, presidente del Comité de Redacción del «The Metallurgist», y en la que he leído lo que sigue:

Quiero felicitar efusivamente al Comité de Redacción por haber encontrado un escritor del calibre de F. A. Calvo para escribir su brillante artículo "Metallurgy in Spain" aparecido en el número de enero de "The Metallurgist". "I found this article absolutely fascinating", especialmente después de leer los trabajos científicos de otras revistas generalmente mal escritos, torpes y monótonos...

Y no estará de más señalar que la impresión que produjo dicho trabajo en el Dr. Callender fue tal que determinó el que parte de su familia viniese a España para ver las maravillosas obras de arte y de habilidad metalúrgica de los años 1550 y anteriores existentes en la Catedral de Toledo, o sea que algunos turistas vinieron a España movidos, influidos, por aquel trabajo del Dr. Calvo.

En 1964, y con ocasión del XXV Aniversario de la Fundación del C. S. I. C., publicó como aportación del CENIM, el Patronato «Juan de la Cierva» de Investigación Científica y Técnica, el precioso libro *La España de los metales*, del Dr. Calvo, verdadera joya tanto por sus bellísimos grabados como por su texto y en cuyo prólogo dice así: *El libro está inspirado en las amenas y formativas reflexiones del profesor E. Jimeno durante sus inolvidables lecciones que —afortunadamente para mí— he seguido recibiendo de su generosa vocación docente. Es justo, pues, que este fruto que el maestro cultivó vuelva a él, en mi versión, como rendida ofrenda de gratitud por su ininterrumpido magisterio.*

También con motivo del 25 Aniversario del C. S. I. C. presentó

el Dr. Calvo las técnicas experimentales y las microfotografías obtenidas sobre el tema de Metalurgia de la Soldadura y el éxito de su exposición fue tan grande que yo también acudí a visitarla y pude contemplar sus maravillosas microfotografías de cuyo examen y análisis se derivaron las interpretaciones originales de Calvo.

Pero voy a situarme otra vez en el momento en que estando el Dr. Calvo todavía en Inglaterra decidió su regreso a España. Ante el problema de cómo continuar aquí sus trabajos sometió a la *European Research Office* del *United States Department of the Army* una propuesta de trabajo bajo contrato, que interesó y se firmó entre el Gobierno de los Estados Unidos y el Patronato «Juan de la Cierva» para realizar un estudio fundamental sobre las transformaciones metalúrgicas que tienen lugar y las tensiones desarrolladas durante la soldadura, utilizando la *técnica de la superficie pulida* desarrollada por el investigador principal de dicho contrato el Dr. F. A. Calvo. Al terminar el primer año, la propuesta de renovación se hizo duplicando su importe, pasando de 300 a 600.000 pesetas/año. Se aceptaron las nuevas condiciones y el contrato fue renovado. Pero por ciertas dificultades de régimen interior en el Instituto de la Soldadura donde no se le dieron seguridades para poder seguir cumpliendo lo contratado, creyó oportuno renunciar a la continuación por tiempo ilimitado, que se le ofrecía al terminar la primera prórroga. Durante los dos años que trabajó con el señor Revuelta, bajo este contrato, se redactaron los correspondientes informes que con el título "*Welding Metallurgy of Steels*", *Progress Reports n.º 1 y 2*", se les autorizó a presentar a la consideración de la Comisión IX del Instituto Internacional de la Soldadura en su reunión de Helsinki en 1962.

La técnica se mejoró notablemente en este período construyéndose una cámara muy compleja, que fue objeto de una patente (patente española, 285.476, 1963), y registrando los ciclos térmicos en un aparato potenciométrico, rápido y preciso al que se acopló un relé para el corte automático del arco cuando se alcanzaba una temperatura prefijada. Lograron observar transformaciones sucesivas sobre un mismo punto: ensayaron aceros aleados y un acero eutectoide, y emplearon mezclas de $Ar + H_2$ en la atmósfera de la cámara.

De los resultados de dicho trabajo salió la tesis dirigida por el Dr. Calvo de su colaborador el Dr. Revuelta Hidalgo.

La casa *Veb Carl Zeiss Jena* se interesó por la cámara llamada

T. S. P. del Dr. Calvo y estaba dispuesta a adquirir la patente, pero surgieron dificultades debido a que dicha patente fue desarrollada durante el contrato con el Gobierno de los EE. UU.

El Consejo Técnico Administrativo del Instituto de la Soldadura acordó por unanimidad conceder al Dr. Calvo dos premios porque en palabras de su Presidente: *Ha considerado que ha sido la destacada labor investigadora de Vd. y su proyección en el extranjero, así como el interés suscitado por las técnicas que ha puesto a punto, lo que ha dado lugar a la firma de ambos contratos que, en definitiva, son una consecuencia de sus méritos científicos.*

Estaban aún sin explorar las posibilidades de dicha técnica en relación con los metales no férreos y para poder iniciar el trabajo correspondiente solicitó, y le fue concedida, una Ayuda de Investigación de la Fundación Juan March, en la convocatoria de 1961. Durante el tiempo que la disfrutó ensayó en su cámara diversos tipos de cobres, latones, bronce de aluminio, aluminio puro y duraluminio. Se fue dando cuenta de los resultados que se iban obteniendo con motivo de la Ayuda March en la Reunión Bienal de la R. Soc. Esp. de Física y Química celebrada en Bilbao en 1963, en el seno de la Comisión núm. IX del IIS (Asamblea de Praga, 1964), y en la I Asamblea del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. A pesar de no haberse publicado los resultados, lo que trascendió de las comunicaciones verbales y visitas atendidas, determinó reiteradas invitaciones de la BWRA y otra del Ministerio de Educación Alemán; ésta para dar ciclos de Conferencias durante periodos de varios meses, invitaciones que el Dr. Calvo no pudo aceptar por estar comprometido en el trabajo de la Ayuda March. No obstante, a sus colegas de Abington Hall tuvo ocasión de hablarles, pues se trasladó allí para utilizar el microscopio electrónico en el estudio de las probetas de cobre que habían ensayado en la cámara. Por cierto que en esa ocasión fue entrevistado por un redactor de la B. B. C., de Londres para la emisión *Españoles en Inglaterra*, que se transmitió para España e Hispanoamérica porque habían sido informados del empleo de su técnica en laboratorios ingleses.

Durante el tiempo que ha permanecido en el Instituto de la Soldadura ha realizado numerosos trabajos de asesoramiento, dictámenes, estudios concretos de problemas planteados por la industria y hasta verdaderos trabajos de investigación, como fueron los que llevan por título *Los aceros extrarrápidos tipo I-4-I Co. Algunos pro-*

blemas metalúrgicos de su soldadura por chispa a un acero al carbono y Metalurgia de las uniones heterogéneas. I. Unión acero-cobre.

Dio multitud de dictámenes sobre causas de rotura y concretamente uno de ellos tuvo especial éxito: se refería a un tambor de freno y la firma americana afectada, como constructora del vehículo, admitió la reclamación y felicitó a la propietaria española por el informe remitido.

El Dr. Felipe Calvo ha ejercido la docencia en sus diferentes grados con un entusiasmo y ejemplaridad insuperables: Profesor Ayudante de Química Inorgánica (1946-48), Profesor Adjunto de Química Industrial (1956-58) en nuestra Facultad de Ciencias, Profesor de Metalurgia en la Escuela de la Soldadura del C. S. I. C. (1961-65). En 1966 gana por oposición la Cátedra de Metalurgia de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Barcelona y en 1971 pasa a ocupar su cátedra actual de Metalurgia en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid.

Ya antes me he referido a las conferencias y cursillos que con tanto éxito ha desarrollado en el extranjero y sus nombramientos en 1960 de Fellow de la *Institution of Metallurgists* y en 1971 de *Fellow of the Welding Institute* y también de *Fellow de la Institution of Mining and Metallurgy*, los tres Fellowships de Inglaterra, revelan el prestigio de que goza en el extranjero, donde se le considera autoridad mundial en Metalurgia de la Soldadura.

En 1966 recibió el Premio Francisco Franco individual a la Investigación Técnica.

Está en posesión de la Encomienda de la Orden Civil de Alfonso X el Sabio. Es consejero de la *Internacional Metallographic Society*.

El 20 de febrero de 1975 tomó posesión de su cargo de Académico de Número de la Real Academia de Farmacia.

Ha sido Vicerrector de la Universidad Nacional de Educación a Distancia y de la Universidad Complutense, y en la actualidad es Presidente de la Comisión Gestora de la Universidad de Alcalá.

Al posesionarse de su Cátedra de Metalurgia en la Universidad de Barcelona, el día 1 de mayo de 1966, pronunció un breve discurso ante el Señor Rector y Profesores del que tomo las siguientes frases:

Voy a apresurarme a deciros —para que comprendáis mejor el especial significado que tiene para mí este momento— que tuve el

privilegio de nacer en un hogar de padres Maestros, en el más elemental grado de la educación, y que el Maestro que en la Universidad, por fortuna, encontré —el Dr. Jimeno— fue precisamente el hombre que en esta misma Universidad sembraba, por los años treinta, una inquietud metalúrgica que, aún no hace un año, cristalizó en la Cátedra de que acabo de tomar posesión.

A los alumnos les hubiera dicho que he venido aquí por y para ellos que van a ser, a partir de hoy, la razón de mi vida profesional; que trataré de trasladarles las inquietudes de mi magisterio para ganarme la deliciosa recompensa del mismo entrañable cariño que yo guardo a los que a mí me enseñaron y educaron.

A consecuencia de la primera entrevista que hizo al profesor Calvo el periodista Sr. del Arco, y que se publicó en la *Vanguardia* de Barcelona, y en la cual se hacía alusión al cinabrio y al beneficio del mercurio, recibió una invitación para colaborar con las Minas de Almadén y Arrayanes, que fue aceptada.

El Instituto Tecnológico-Metalúrgico Emilio Jimeno, de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Barcelona, había sido creado por O. M. del 17 de noviembre de 1956, y cuando se hizo cargo de la Cátedra de Metalurgia el Prof. Calvo estaba dicho Instituto aún sin señales de vida, pues nada había en él y ¡cuánto entusiasmo, tuvo que derrochar y cuántas dificultades tuvo que vencer! el nuevo Catedrático, pues como ya lo dijo Horacio: *Nihil sine magno vita labore dedit mortalibus*. Después de larga meditación, preparó el Reglamento de dicho Instituto, lo puso en marcha, le dio vida y cuando años más tarde tuvo que dejarlo para ocupar su Cátedra de Metalurgia en Madrid, dejó un Instituto en funcionamiento bien dotado, con personal entrenado y trabajando con entusiasmo.

Entre los aparatos que adquirió figura un aparato de difracción de rayos X Kristaloflex 4, para cuya adquisición la Fundación Humboldt contribuyó con 50.000 marcos, un micro analizador por haz electrónico (microsonda), laboratorio completo de preparación de minerales, etc.

Durante el tiempo que el profesor Calvo estuvo al frente de la Cátedra de Metalurgia y del Instituto E. Jimeno (1966-1971), se prepararon varios trabajos de investigación, 6 tesis doctorales, reunió la más completa información bibliográfica sobre el mercurio y sus aplicaciones y registró cuatro patentes industriales.

Ya antes he mencionado que, en 1963, el Dr. Calvo patentó la cámara llamada T. S. P., pues bien, como consecuencia de sus in-

vestigaciones sobre el cinabrio y el mercurio, en Barcelona, surgieron cuatro patentes: dos se refieren al tratamiento de los llamados hollines en la metalurgia del mercurio para recuperar el mercurio que contienen; una de ellas por arrastre en corriente de vapor y la otra por amalgamación. La tercera patente se refiere a la concentración por flotación del mineral de Almadén, y la cuarta patente se refiere a aplicaciones del mercurio empleándole en el sinterizado de polvos metálicos.

Después de su venida a Madrid, y como muestra de que su genio investigador e inventivo sigue aún fértil, en octubre de 1975, ha patentado otro procedimiento para extraer el mercurio de sus minerales por vía húmeda, solubilizándolo en forma de complejo.

Al año de llegar a Barcelona el Sr. Rector le nombró Director del Colegio Mayor San Raimundo de Peñafort (que lleva ese nombre en recuerdo del famoso religioso del siglo XIII, príncipe de los canonistas y patrón de los abogados). Realizó el Prof. Calvo una gran labor en dicho cargo: creó la Biblioteca, los laboratorios fotográficos y de Biología, un taller de carpintería, electricidad, electrónica y mecánica que fue utilizado por los colegiales de Enseñanzas Técnicas y Experimentales, y la Semana de Cine Científico, en la que se proyectaban películas de interés científico o técnico previamente seleccionadas por un Comité de selección y comentadas antes de ser proyectadas, por un Catedrático o Profesor de la Universidad, y fue tan grande el éxito de esa Semana de Cine Científico que hubo necesidad de proyectarla en sesiones de tarde y noche tanto en el salón de actos del Colegio como en el de la Facultad de Farmacia próxima a dicho Colegio y ha habido años que han asistido hasta 15.000 personas.

El 15 de junio de 1971 pronunció en dicho Colegio un discurso de despedida en el que revisó y analizó toda su actuación al frente de dicha Institución a la que consideró fundamental para la vida universitaria.

Nada me sorprende la gratitud de los alumnos del Colegio Mayor San Raimundo de Peñafort, quienes entregaron al Prof. Calvo un precioso reloj en el que he leído la siguiente y bien significativa inscripción: *Al Dr. F. A. Calvo. En reconocimiento a su gran lección de Amor, entrega y enseñanza. Barcelona 15-6-1971.*

El Magisterio del Prof. Calvo en la Universidad de Barcelona fue completo: creó escuela docente y de investigación y dejó estela de hombría de bien y de profesor ejemplar.

También quiero destacar la defensa valiente que hizo del profesor D. José Ibarz, catedrático de Físico-Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Barcelona frente a una campaña insidiosa, injusta, desatada contra él, y cuando falleció dicho compañero preparó un trabajo titulado: *Ha muerto el Dr. Ibarz*, que fue enviado por el Sr. Rector a la *Vanguardia* de Barcelona, y ésta se negó a publicarlo si no se hacían importantes modificaciones que el profesor Calvo, firme y sincero en la expresión de sus sentimientos, no lo aceptó y por eso se publicó en *Química e Industria* (volumen 18, núm. 8, sept. 1972, p. 27). Se trata de un bello artículo y con fondo; voy a transcribir dos de sus párrafos:

Al Dr. Ibarz le correspondió, en vida, explicar una de las disciplinas conceptualmente más difíciles, pero más universal: la termodinámica. Por ello sabía muy bien hacia dónde evolucionan espontáneamente los sistemas, y qué energía se pone en juego en el cambio. Para dominarlos, como corresponde a los seres inteligentes, para que la evolución no sea explosiva, catastrófica, incontrolada, el proceso evolutivo debe ser continuo pero reversible en cada momento; necesariamente lento. Frente al caos termodinámico, frente al desorden absoluto de la máxima entropía, él quería la energía ordenadora y civilizante, la que la naturaleza hizo posible un cristal de diamante, la que llevó al hombre a la armonía y belleza de un claustro románico o al rigor de una ecuación. Una naturaleza dominada y limpia en la que los hombres aportasen al orden, culto respetuoso, el instinto domado, la destreza incómoda, la voluntad dominante; donde lo único espontáneo e ilimitado fuese la generosidad. Unos años más y el Dr. Ibarz hubiera podido ofrecer en su última lección, frente al clásico ejemplo de entropía cero —la del cristal perfecto, de una sustancia pura en el cero absoluto— el ejemplo ya acabado de máxima entropía y mínima energía: la Universidad.

Muchas veces he coincidido con D. Emilio Jimeno en la Biblioteca del Instituto Británico y en más de una ocasión hemos comentado que el Maestro debe enseñar con amor, fe y entusiasmo y que si no hay afecto a la disciplina y a la profesión, si no hay vocación de Maestro y si no hay amor a los alumnos, no hay enseñanza posible.

Don Emilio fue querido por todos sus alumnos porque él supo derramar afecto entre ellos y concretamente la relación entre Felipe Calvo y su Maestro fue realmente ejemplar y le atendió como si fuera su padre, en muchas circunstancias y muy especialmente en su última etapa en el Hospital Clínico.

Don Emilio siempre que nos encontrábamos tenía un recuerdo de elogio para su discípulo preferido y me hablaba del fervor y de la eficacia con que el profesor Calvo se consagraba a la docencia y a la investigación. He querido conocer directamente el estilo pedagógico de nuestro recipiendario y concretamente el día 15 de marzo de 1977, asistí a una lección suya en su Curso de Metalurgia Extractiva. Me senté en un pupitre al final de la clase. A los alumnos —ninguno de ellos me conocía y yo entré allí de incógnito— les sorprendió que a una persona de mi edad pudiera interesarle un tema sobre Metalurgia, pero así fue, y escuché con verdadera unción la lección de Calvo y pude comprobar la claridad y la competencia con que expuso y la atención que le prestaron sus alumnos.

El tema versó sobre el *monstruo metalúrgico*, o sea el *Horno Alto*, y ello me trajo el recuerdo de mis años juveniles, cuando durante los cursos 1931-1936 explicaba yo en el Instituto Cardenal Cisneros, además de la Agricultura, la Tecnología Industrial, y daba a conocer a mis alumnos, naturalmente en tono menor, la metalurgia del hierro y de otros metales y les llevaba desde Madrid a Baracaldo y Sestao para contemplar una colada del Horno Alto, y para que vieran desde la otra orilla del Nervión y de noche el espectáculo impresionante de la descarburación de la fundición en los convertidores Bessemer.

Y no me olvido al escribir estas líneas de la magnífica conferencia pronunciada, precisamente en Bilbao, por mi querido Maestro, D. Obdulio, en septiembre de 1919, sobre *Provecho que la Siderurgia ha obtenido de las Ciencias Físico-Químicas* y en la cual propugló porque se creara en la capital vizcaina un *Instituto Siderúrgico*, con sostenimiento a cargo de las Sociedades propietarias de las fábricas, destinado a formar una *Escuela de Investigadores Siderúrgicos* para formar buenos profesionales e investigadores capacitados para las grandes innovaciones de la Metalurgia.

Pero debo confesar que asistí a la clase del profesor Calvo no solamente por curiosidad, para conocer su estilo docente, sino también en justa correspondencia a la gentileza que él tuvo el día 7 de noviembre de 1972 de asistir a mi última lección oficial en nuestra Facultad de Ciencias y además al llegar a casa me esperaban dos rosas blancas, modeladas en bizcocho de porcelana y por lo tanto inmarcesibles, enviadas por él y acompañadas de unas líneas muy expresivas con esa caligrafía suya que le enseñaron sus padres, tan limpia, tan clara, tan elegante, que revela plucritud, orden, exacti-

tud, rectitud, lógica y armonía mental. Esas rosas blancas, recibidas en el día de mi jubilación, me llenaron de emoción, porque revelaban afecto, amistad, y me trajeron el recuerdo del apóstol de la independencia de Cuba, el distinguido poeta José Martí con su bella poesía *Yo cultivo una rosa blanca*.

El profesor Calvo es universitario ejemplar y no sólo es investigador, con prestigio internacional en su especialidad, sino que también es escritor distinguido y pensador fino y hasta poeta.

Decía Pascal: *El hombre ha sido creado para pensar; toda su dignidad, todo su mérito ahí estriban y su deber es pensar como debe*. Pues bien, como prueba de que el profesor Calvo es pensador y poeta voy a referirme a su poema en prosa titulado *Niño* y por el cual el Ayuntamiento de Palencia le concedió en 1962 el primer premio *Día del Maestro*.

Dicho poema, en prosa, consta de 25 versos. Coincido con el profesor D. Angel Vian en que dichos versos saben a Kipling (1).

Es tan precioso dicho poema que lo reproduzco íntegro a continuación:

N I Ñ O :

CUANDO el mundo te descubra lo que aquí no aprendiste, pero tarde ya para que tú te asombres.

CUANDO, asomado a tu vida, sientas compasión por los que tanto ignoran.

CUANDO abrases tu deber, sin sentir sudor de bíblico castigo.

CUANDO sepas, por igual, hacer y pensar.

CUANDO tu voz diga lo que el corazón le manda.

CUANDO, desde tu rincón, admires el mundo alabando a Dios.

CUANDO a tu prójimo distingas con la caridad de un Santo.

CUANDO sepas darlo todo para disfrutar con nada.

CUANDO con amor perdones; cuando tengas sólo hermanos.

CUANDO gustes a qué sabe la envidia domada y huelas la flor del odio enterrado.

CUANDO, espléndido, ahogues tu egoísmo adulto.

(1) Discurso del profesor Dr. D. Angel Vian del 20-2-75 en la Real Academia de Farmacia en contestación al discurso del profesor F. A. Calvo titulado «Cara y cruz del mercurio».

CUANDO puedas comprender la sencilla grandeza de saberte amado.
CUANDO, en tus ausencias, los vientos te traigan lo que ahora no aprecias.

CUANDO muchas mañanas, el sol te sorprenda asido a tu afán.

CUANDO tengas prisa por crecer, y dejes tu niñez con pena.

CUANDO veas que tus padres gozan esa felicidad entera.

CUANDO los despidas hasta el Cielo, y los honres, aquí, labrando esta tierra.

CUANDO encuentres tu moza y la hagas tu esposa. Cuando, siendo señor, la hagas tu señora.

CUANDO lleguen los hijos aprendiendo virtudes que nunca han leído.

CUANDO tú les duermas, mientras ella vela la felicidad de todos.

CUANDO los eduques con el rigor de tus besos, y con la caricia de tu justo enfado. Cuando hagas, con la vida, cuentos, en los que los digas quiénes son los buenos.

CUANDO goces, llorando, tus alegres penas. Cuando lleves, sereno, tristes alegrías.

CUANDO sientas que hay un hombre metido en tus huesos.

CUANDO esperes tranquilo sabiendo qué esperas.

CUANDO reces, de verdad, sólo un Padrenuestro.

ENTONCES, HIJO MÍO, BENDECIRÁS AL MAESTRO QUE VINO A ESTA ESCUELA,
PARA HACERTE HOMBRE, HACIÉNDOSE ÉL NIÑO.

Los discursos y conferencias del profesor Calvo son tan meditados, tan enjundiosos, tan educativos y tan valientes que creo merecería la pena de que se publicaran en un volumen. En todos ellos se refleja su bondad, su hombría de bien, su gran pasión por la enseñanza y su preocupación por la Universidad. A continuación reproduzco parte de algunos de ellos.

De las frases de despedida que pronunció con ocasión del homenaje de sus compañeros de la Facultad de Ciencias de Barcelona, solamente voy a reproducir las dos frases que siguen:

He tratado de servir a esta Universidad con lealtad, cumpliendo el deber que, por vocación, nos impusimos.

.....

A vosotros, amigos, ruego que, en mi ausencia, sigáis protegiendo y estimulando lo que aquí dejo.

En septiembre de 1973 y con ocasión de la XVI Reunión Bial de la Real Sociedad de Física y Química, pronunció en Oviedo la

conferencia plenaria que versó sobre la obra ingente de D. Antonio Raimundo Ibáñez, que se ganó en Sargadelos (Galicia) la admiración y el respeto de la Historia, pero a pesar de eso fue vilmente asesinado. El dramático desenlace de la genial aventura de aquel asturiano insigne ha servido de inspiración al profesor Calvo para darnos al final de su preciosa conferencia una interpretación termodinámica original del primero y único Marqués de Sargadelos.

De su conferencia *Pregón del Recuerdo, el Deseo y la Esperanza* pronunciada en Cervera de Pisuerga (Palencia) con ocasión del Día de la Provincia (septiembre de 1974), reproduzco las siguientes líneas:

El deseo que quiero pregonar tiene dimensiones de milagro. Es como resucitar un muerto. Es la Cultura —la Cultura con mayúscula— que está muriendo, no sé por qué, con el transistor, la comodidad, el sexo..., con la rebeldía infecunda de la holganza y de lo sucio.

La cultura que quisiera revivir, no viene necesariamente con la instrucción; ya lo estáis viendo. Hay zafios instruidos y analfabetos cultos. Hay bachilleres en saberes que asaltan, destruyen, ofenden, roban y vagan; y hay menestrales sensibles, respetuosos, generosos, ponderados y justos. El mundo necesita la cultura del respeto, que no entiende de ecuaciones ni balances; justicia y caridad que diría D. Elpidio. La cultura que permite vivir sosegado y feliz en la pobreza; que inquieta y preocupa en la opulencia. La cultura mística que se mama, y se ejerce con el prójimo; la de los mandamientos de la Ley de Dios. La cultura de hacer y gozar las cosas bellas. La cultura en la que se entienden el sabio y el lego. La cultura del sentimiento que hace llorar la alegría y sonreír las penas. La cultura del poeta que, según Valentín Bleye, «sobre la agitación de las moléculas, sobre la vibración de los átomos, vislumbra el inefable estremecimiento de los anhelos y las añoranzas... Descubre las leyes invencibles del amor, de la nostalgia, del recuerdo...»

La cultura profunda y contagiosa del hogar, que es donde los hombres se salvan o condenan; la única que puede salvar «una sociedad hostil o incómoda que se asfía de consumo innecesario, aherrrojada por la estupidez y el vicio, condenada a consumirse en su propia insipidez. Esta cultura es, además, condición necesaria del progreso; es a la sociedad, lo que la buena y bien trabajada tierra a la simiente.

Buscando esa Cultura universal, sin pentagrama, hemos venido

desde la Universidad a la montaña y a Castilla, de la ciudad al campo. La hemos encontrado, pero está dormida; anesthesiada, mejor. ¡Sacadla, maestros y poetas, del letargo!

La esperanza está en que la juventud devuelva su saber a la experiencia y ceda todo lo que de mito tiene su arrogancia. Ser joven, Reinas, damas y muchachas, es una circunstancia relativa, transitoria, inaplazable, inmerecida, universal y sin valor intrínseco por la que pasa todo ser humano, antes de peinar canas o quedarse calvo; es una calidad que no se gana y que se pierde de la noche a la mañana. Poco o nada, como veis, si cada uno no pone sus años por delante, y sus frescas energías, al servicio de una causa amada y culta. Para que una juventud merezca esta esperanza, tiene que saber repartir con generosidad lo suyo; su esfuerzo, su limpia alegría, su fácil perdón, su desenfado, su respeto... ¿Comprendéis, juventud de hoy, la generosidad de morir de veinte años por salvar un ideal, sea el que sea? ¿Que qué es un ideal? Los ideales, muchacho, son como los luceros; es imposible alcanzarlos con las manos, pero, como el marinero en el desierto de las aguas, ténlos como guía..., ellos te llevarán a tu destino.

Y tu destino aquí, en esta tierra que sufrimos y gozamos, hace el destino del mundo, como un grano una cosecha. ¡Anda, zagal, honra a tu padre y a tu madre, toma tu vez, y sigue a tus maestros y poetas!

Con motivo de la inauguración del nuevo local del Colegio de Médicos de Palencia, en 1975, pronunció una Conferencia titulada *La Universidad desde dentro. Reflexiones en familia*, de la cual reproduzco las siguientes líneas:

A pesar de todo, si hubiera de contestar a la pregunta de si sigue vigente la Universidad, diría rotundamente SI.

Mi sí rotundo es, naturalmente, para la Universidad comprometida, creadora y enseñante, que cultiva la razón, el método, la crítica; que transmite inquietudes trascendentes; que, partiendo de virtudes, desarrolla cualidades positivas; que nos llena de esperanza en el hombre que ella forma; que trabaja en el recuerdo de los que fueron y quiere estar en la memoria de los siglos venideros. Sí a la Universidad que, a través de los sentidos del presente, atiende las necesidades del que falta; a la que hace de discípulos Maestros; a la Universidad alegre, tensa, vigilante; a la que se enciende de rubor por la injusticia, a la que resplandece blanca en síntesis equilibrada

de colores y culturas; a la que envejece en verdades demostrables, demostradas. A esta sí.

Mi NO rotundo va para la Universidad manipulada; para la preñada de extrañas intenciones; para la Universidad chantageada; para la Universidad viciada y viciosa; para la que no distingue un aprendiz de un buen maestro; para la Universidad abierta al sexo y a la irresponsabilidad, cerrada al sacrificio y al trabajo. No a la Universidad montada en demagogia; a la sucia hasta la repugnancia; a la Universidad paritaria y claudicante; a la degenerada que no se reproduce más que en híbridos estériles. A esta NO.

De su discurso de apertura de Curso de la Nueva Universidad de Alcalá (nov. de 1976), tomo las siguientes líneas, que me recuerdan también al *JF* de R. Kipling:

Es de suponer que él nos diría (se refiere al Cardenal Cisneros): Vuestra Universidad se salvará y será fecunda, si el alumno se siente trabajador de esta empresa trascendente y la hace suya; si es consciente de su privilegio, aunque sea merecido; si tiene a punto el recuerdo para los que quedaron en el tajo oscuro, en la besana cegadora, o en el mar incierto porque, igualmente inteligentes e ilusionados les faltó su circunstancia; si acepta el reto de aprender con sacrificio para ejercer su oficio, en su momento, con la misma generosidad de la que él hoy se beneficia; si sabe ejercitar su libertad en el respeto; si llega educado y no pierde la educación mientras aprovecha su talento; si su juventud no es una excusa; si sabe de ideales y cultiva la obligación de su alegría.

Si, por el contrario, refugia su falta de valor frente al trabajo serio en una rebeldía inconsecuente; si, ayuno de ideales, se queda en la holganza o el placer; si hace de la falta de educación, de la incapacidad para la convivencia y el respeto, una religión, un rito; si, sucio de solemnidad, pretende desde la incompetencia, la pereza, el vicio, cambiar lo que pueda estorbar sus siestas, no sus sueños, que no tiene; si falto de tesón y de talento, bosteza tópicos sin cuento; si «contesta» porque sí una actitud, sin descender al contenido; si niega el valor de la experiencia sencillamente porque no le alcanza; si no sabe sembrar y esperar, y quiere la cosecha a cuenta... Entonces dejad la Universidad al turno de milagros.

Al mismo turno que si os faltase la difícil figura del maestro tenso, que ama al discípulo desde una autoridad prestigiosa y se mejora en él dando continuidad con el ejemplo que inspira a voluntades virge-

nes, para lograr el hombre uno, múltiple y complejo, racional, emocional y emocionante; el único ser que sabe de su historia y que, con ella y su talento, enriquece cada día su aventura temporal y se eterniza. Ya sé que en vuestros tiempos esto suena a música celestial... Sin embargo, eso es educar; poner música y rima a cada afán, hacer con la geometría un pentagrama, un jardín con los colores del espectro, y hacer del movimiento vibratorio una palabra.

Dos años después, el 20 de noviembre de 1978, el Ayuntamiento de Alcalá de Henares le nombró *Hijo Adoptivo* de la ciudad y de su discurso de contestación reproduzco las últimas líneas:

Quiénes habéis tenido la fortuna de nacer en Alcalá, habéis perdido el difícil honor de la adopción que me habéis concedido; y hasta es posible que os cueste entender por qué una familia palentina se puede emocionar hasta este extremo, cuando se siente nacer a otra patria chica; es que aún creemos que lo que hace grande a la Patria grande, es la suma de Patrias chicas.

Para cuando el destino nos aleje —que no separe— quisiéramos, Señor Alcalde, tener en Alcalá algo entrañable donde acostar los sueños; un hogar abrazado a una cruz, apoyado en piedra noble, acariciado por los aires cargados de moléculas de historia; cerca del Cardenal para seguir aprendiendo santa terquedad; saludado por el alba, despedido por púrpuras de ocaso, velado por Dios en lunas y en estrellas; elevado del suelo para bien escuchar decires, oraciones y suspiros; un hogar hecho de palo y barro, mezcla de instinto y de nostalgia que nos trae donde debemos y nos lleva donde hace falta... El hogar que os pido, ahora está vacío, se ocupa en la temprana primavera, pero conocemos desde niños a su dueña; lo que os pido, alcaláinos, es ese nido que una familia de cigüeñas ha construido, como un prodigio de equilibrio, rematando la espadaña de la capilla Universitaria.

Gracias complutenses. Descendiente, al parecer, de Laín Calvo, juez de Castilla, paisano de Jorge Manrique y de Alonso Berruguete, acabo el día nada menos que vecino de Cervantes y prójimo del Cardenal Cisneros, holgado en Patrias y cargado de afectos. ¡Cómo queréis que no sea vanidoso!

Eminencia: confieso mi vanidad pero no puede arrepentirme. ¿Es mucho pecado morir con el orgullo de ser hijo de Alcalá? Si lo fuera, allá en el Purgatorio, por orgullosos, todos sus hijos nos veremos. Paz y bien.

He tratado de presentarles de la forma más concisa posible lo esencial de la labor investigadora, cultural y docente del recipiendario, pero considero que es obligado recordar la frase del inspirado poeta francés Lamartine, que dice así: *En el origen de toda obra grande siempre hay una mujer*. Y en efecto, la esposa del Prof. Calvo, D.^a Lucía, familiarmente Luchi, *de auténtico oro de ley*, ha estado siempre a su lado, prestándole toda la ayuda que ella podía darle y por ser palentina pertenece a esa élite de heroicas mujeres a las que el Rey Juan I de Castilla concedió el privilegio de usar la banda dorada que estaba reservada a los caballeros, en premio a que, hallándose ausentes en el ejército del Rey todos los hombres de Palencia, la defendieran ellas solas, derrotando a los ingleses del Duque de Lancaster y pereciendo muchas en los asaltos a la ciudad.

Y ahora, como es protocolario, haré un breve comentario sobre el muy valioso y trascendental discurso del recipiendario.

El Prof. Calvo contempla e interpreta el tema desde la perspectiva de la Química y la Metalurgia y, como gusta siempre hacer, busca raíces en la Historia, y allí encuentra que el componente de fantasía que el hombre desarrolla cuando se encuentra con fenómenos naturales inexplicables todavía, está presente en las interpretaciones de los pensadores más caracterizados de cada época. Y encuentra, también, que el hombre anticipó hace siglos fenómenos de disolución, transporte y precipitación, e intuyó que la energía interna de la Tierra, que en tantas y tan sobrecogedoras manifestaciones se ofrecía, tenía su parte en el «negocio». Aporta, para centrar así el problema, los textos más reveladores y oportunos.

El Prof. Calvo nos ha hablado de *Thales*, de *Teofrasto*, de *Alberto Magno*, de *Biringuccio*, de *Georgius Agricola* y muy especialmente de *Alvaro Alonso Barba* y de su magistral obra *Arte de los Metales*, universalmente elogiada y cuya importancia queda reflejada por las numerosas ediciones que de ella se hicieron en España e Hispano-América y que fue traducida al inglés, alemán, francés, holandés e italiano.

Precisamente nuestro recipiendario ha puesto un magnífico prólogo a la edición de 1977, patrocinada por la Unión Explosivos Río-tinto, S. A., facsímil de la tercera edición impresa en Madrid en 1770 (la primera edición fue la de 1640). De dicho prólogo reproduzco las últimas líneas:

Yo te dejo lector, por cierto en buena pluma, mejor cabeza y

santa vocación. Comprueba por ti mismo, que el saber, el ingenio, la honestidad, la afición, la generosidad, el donaire, el sentido común, hace cuatro siglos que nacieron; por lo menos en Lepe.

Cuando vayas a Sevilla busca conmigo por Triana el último suspiro del primer sacerdote minero; no sé dónde se ordenó, pero sí que lo canonizó el azogue. ¡Nos hace tanta falta resucitar su estilo!

Don José Rodríguez Carracido, Presidente que fue de esta Real Academia de Ciencias, en su discurso de recepción en la Real Academia Española, 14 de junio de 1908, disertó sobre el *Valor de la Literatura Científica Hispano-Americana*, y al referirse a Alvaro Alonso Barba dijo así:

¡Qué figura intelectual y moral tan admirable la de este metalurgo! Su magnitud es tan extraordinaria, que Hoefer la exceptúa del desdén con que trata a los españoles, diciendo en su Historia de la Química, que es la única en todo el siglo XVII digna de especial mención.

Y el mismo J. R. Carracido, en la conferencia que pronunció en el Ateneo de Madrid el 17-3-1892, sobre los *Metalúrgicos españoles en América*, al referirse al *Arte de los metales* de Alvaro Alonso Barba, dijo así: *Este libro, gloria de la ciencia española, es de lo más castizo que podemos presentar, tanto por su lenguaje como por sus ideas, que también éstas tienen sello nacional en su origen, por más que sean cosmopolitas después en su adaptación.*

La ciencia ilumina ahora los hechos que interesaron e inquietaron a los hombres inteligentes de todas las edades, pero su luz es aún insuficiente y sigue, por obligación, abriéndose paso en unas apasionantes tinieblas palpando e imaginando racionalmente, pero imaginando.

La forma en que Calvo nos introduce en el estado actual del problema es, a mi entender, un pleno acierto de expresión: *Todo ocurrió de tal manera...*, porque esa *manera* sigue siendo objeto controvertido del razonamiento crítico que termina siempre en un postulado hipotético con más o menos base experimental. Y las hipótesis siguen múltiples, matizadas o contrapuestas cargadas de imaginación, ante el apasionante fenómeno telúrico de la segregación de los elementos químicos.

Es muy importante que los problemas universales se ofrezcan desde distintas perspectivas y sean contemplados por hombres de va-

riada base científica. Sólo el esfuerzo coordinado, sin celos, de los hombres de buena voluntad, puede hacer avanzar el conocimiento.

Aquí nos ha traído nada más una parte de sus propios resultados en la investigación de la estructura de algunos minerales sulfurados de interés metalúrgico, y porque el concepto de Patria no le es indiferente —como no le era a D. Emilio— se ha fijado en un mineral bien español: en el cinabrio. ¡Tan español que apenas había sido estudiado!

Las técnicas metalográficas de observación de microestructuras, los razonamientos termodinámicos que definen la razón del cambio y los sistemas en equilibrio, la afinidad química que queda manifiesta en los compuestos o en la falta de ellos, y la cinética que dice el cómo de ello, son los elementos que le permiten ofrecernos los detalles inéditos de una microestructura y una interpretación matizada de su posible formación. Y lo hace de una forma respetuosa, prudente y firme a la vez, con una idea clara de hasta dónde puede llegar, exagerando a veces sus limitaciones.

Algunos de esos detalles microestructurales inéditos, por él descubiertos, los podrán ver en la colección de sorprendentes micrografías que ilustran la publicación de su discurso que se les va a entregar al final de este acto. Me consta que estamos ante unas imágenes que son primeras y trascendentales en la interpretación de estos minerales. Ante esos documentos gráficos difícilmente se puede discutir ni el idiomorfismo de los cristales de cuarzo, ni la fidelidad con que el cinabrio reproduce por moldeo los espacios que llena.

Imaginar racionalmente cómo se llegó a ello a escala telúrica, es el problema. Calvo ofrece su hipótesis genésica congruente con lo observado y basándose en ello, también, discute con rigor otras interpretaciones de diversos autores, dedicando especial atención a la del Dr. Saupé quien, invitado por el Prof. Calvo, tuvo ocasión de conocer en detalle sus trabajos y la oportunidad de discutirlos personalmente en reunión de Departamento.

Mi especialidad no me permite analizar con más profundidad su aportación, pero sí apreciar que hubo método, base y rigor científicos, y que es oportuna en un campo donde, estoy seguro, los geólogos recibirán con interés los hallazgos de Calvo y de su colaborador el Dr. Guilemany, y sabrán analizar sus ideas con el espíritu de colaboración científica con que se ofrece. Esas ideas no pueden ser heréticas porque no hay principios ciertos en ese campo. Su novedad se

basa en observaciones nuevas e indiscutibles y harán bien quienes cultiven esta especialidad en no ignorarlas.

Calvo ha respondido a un compromiso nacional para que España, ante el mundo, mereciera esta riqueza. La singular concentración de mercurio en Almadén seguirá esperando el acuerdo sobre su génesis pero ciertamente Calvo, aceptando el reto, ha hecho blanco en su objetivo, y conociendo su entusiasmo estoy seguro que seguirá investigando.

Ninguna aportación personal, en el campo experimental, puedo yo presentar sobre el tema de la Mineralogénesis del Cinabrio, que con tanta competencia y tanta autoridad nos ha expuesto el Prof. Calvo.

He utilizado multitud de veces el cinabrio pulverizado para ensayos por vía seca por la facilidad con que se separan sus dos componentes: el azufre y el mercurio. También he preparado a partir del mercurio metálico algunos reactivos tales como el de *Millon* por la acción del NO_3H sobre el Hg; la reacción es peligrosa por la abundancia de vapores nitrosos tóxicos que se producen y hay que realizarla bajo campana para gases. El *reactivo de Millon*, como es bien sabido, se utiliza para caracterizar la presencia de grupos fenólicos —por ej. *tirosina*— en las proteínas. En la marcha analítica clásica en más de una ocasión he precipitado el ión mercúrico con SH_2 a la temperatura ordinaria para obtener el precipitado de sulfuro de mercurio, negro, insoluble en sulfuro amónico pero evidentemente ese sulfuro no es el cinabrio.

Las aguas terrestres contienen sustancias disueltas y algunas pueden ser sales de hierro, de cobre, o de plomo. Si esas aguas se encuentran en su recorrido con un *sulfuretum* donde, por intervención de ciertas bacterias, se está produciendo SH_2 , se formarán los sulfuros correspondientes y así se han podido formar algunos sulfuros metálicos. Esto me hace pensar que si en la naturaleza llegan vertidos que contengan iones mercurio a un *sulfuretum*, se precipitará sulfuro de mercurio negro, pero no cinabrio.

He visto de cerca azufre de origen volcánico en el propio cráter del Teide, después de la para mí penosa ascensión al gigante de Tenerife, con los Dres. Bravo, los Wildpret, Sventenius, etc., el día 17 de junio de 1949. Ese azufre procedía de vapores de S condensados o de la oxidación incompleta al aire del SH_2 de las emanaciones.

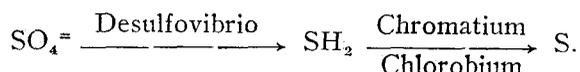
También quiero recordar que el 25 de julio de 1961 visité en el *Microbiological Research Establishment*, en Porton (Inglaterra), al

ilustre microbiólogo Dr. J. R. Postgate, autoridad en el campo de las bacterias que intervienen en el ciclo del S, especialmente en las *anaerobias sulfato-reductoras* del género *Desulfovibrio*, que cumplen misión preponderante en la producción de SH₂ a partir de sulfatos solubles y que se hallan siempre, allí donde se produce SH₂ espontáneamente en sedimentos marinos y lacustres, en los petróleos, en las aguas de los pozos negros, etc.

Con Butlin, Postgate había presentado al Congreso Internacional de Microbiología de Roma (septiembre de 1953) un interesante trabajo (*Microbiological Formation of Sulphide and Sulfur*), donde analizan la formación de SH₂ y de S a partir de los sulfatos presentes en el agua en los lagos cirenaicos cerca de El Agheila, en el Norte de Africa, y citan que *One small lake containing about half a million gallons produced about 100 Tons of sulphur annually.*

En la entrevista que sostuve con el Dr. Postgate me mostró azufre obtenido por vía microbiana y me sugirió la forma de obtenerlo espectacularmente: se siembra en medios con sulfato cálcico el *Desulfovibrio desulfuricans*, que reduce el sulfato a sulfuro y SH₂, y mediante las bacterias fotosintéticas *Chlorobium thiosulfatophilum* y *Chromatium vinosum*, que se siembran en el medio donde se ha desarrollado el *Desulfovibrio* e iluminando los matraces convierten al SH₂ en S.

Luz



El azufre de los lagos cirenaicos es pues de origen biológico producido por la intervención de esos microbios.

También el azufre de los yacimientos de Sicilia, Texas y Louisiana tienen un origen microbiano. Y ¿cómo se ha podido llegar a esa conclusión? Determinando mediante el espectrómetro de masa la relación isotópica entre el S32 y el S34, pues en el S de origen bacteriano dicha relación es superior a la que existe en el azufre de origen plutónico o volcánico, o en el azufre de los meteoritos.

En 1969 el Dr. John Postgate, ya Profesor de Microbiología en la Universidad de Sussex, publicó un excelente libro, *Microbes and Man*, en cuya página 124 se lee: *Hence, isotope experiments provide*

very good evidence that bacteria were responsible for the conversion of sulphate to sulphide during the formation of world's major sulphur resources.

Esto lo conocía desde 1969, cuando leí el libro de Postgate, y al leer la copia del discurso preparado por el Prof. Calvo, pensé en si se habría determinado en el S del cinabrio de Almadén la relación S^{32}/S^{34} y se lo pregunté, y no sólo me contestó afirmativamente sino que puso a mi disposición un trabajo de su discípulo y colaborador el Dr. José M.^a Guilemany, quien, bajo su dirección, preparó en el Instituto Tecnológico Metalúrgico Emilio Jimeno, de Barcelona, el trabajo *Contribución al estudio de la estructura y mineralogénesis de los minerales del mercurio. Aplicaciones de las relaciones isotópicas S^{32}/S^{34} al estudio de la génesis de los sulfuros del mineral de Almadén* (marzo de 1973).

El Prof. Calvo me puso también en relación con su colaborador el Dr. Guilemany, actualmente Prof. Adjunto de su Cátedra, quien me ha facilitado los siguientes datos:

En el azufre de origen bacteriano la relación S^{32}/S^{34} es del orden de 23. En el azufre presente en meteoritos, en los que, naturalmente, no ha habido intervención bacteriana, la relación es de 22,2.

En el azufre del Teide —o sea de origen volcánico— la relación es de 22,17, y en el azufre contenido en el cinabrio de Almadén la relación es de 22,18. Por tanto, el azufre contenido en el cinabrio de Almadén es de origen ígneo, lo que viene en apoyo de la hipótesis postulada por el Prof. Calvo sobre el origen ígneo del cinabrio de Almadén.

Ya que he mencionado a las bacterias sulfato-reductoras voy a referirme brevemente al *fouling* y a la corrosión de los cascos de los buques de hierro en aguas marinas.

Fouling es un término náutico para designar a la fijación y crecimiento de un conjunto heterogéneo de organismos vegetales (algas marinas) y animales (*Balanus*, etc.) sobre el casco sumergido de los buques o sobre cualquiera otra estructura sumergida, planchas de acero, tuberías, tanques, etc. Ese conjunto heterogéneo de seres marinos va mezclado con depósitos de carbonato cálcico, sales de magnesio y de hierro. En ocasiones el *fouling* puede significar en un buque grande que lleva un año en el mar hasta unas 100 toneladas de material adherido al casco, lo que obliga a limpiar fondos periódicamente y minuciosamente, ya que todo ese material extraño adhe-

rido al buque produce mayor resistencia al desplazamiento con disminución de la velocidad y, por tanto, mayor número de días de viaje y aumento de gastos de combustible. Esa operación de limpieza de fondos cuesta anualmente a las Compañías Navieras y a las Armadas de los países marítimos centenares de millones de dólares.

Por debajo de la zona de *fouling* y a pesar de las pinturas de protección *antifouling* el casco presenta alguna corrosión. El proceso de la corrosión es muy complejo y, aparte de los procesos de corrosión electroquímica que tienen lugar en las planchas metálicas sumergidas en aguas saladas, interviene también la acción corrosiva producida por las bacterias *sulfato-reductoras* que abundan en el agua del mar y que en este medio son muy activas. Esas bacterias anaeróbicas reducen los sulfatos a sulfuros que por hidrólisis originan SH_2 , que poco a poco ataca a la estructura sumergida del buque.

Hay que tener presente que esos microbios atacan a los cables eléctricos enterrados en suelos húmedos, aunque estén aislados con caucho, y a las tuberías de conducción de agua, gas, pipelines, etc. ¡Cuántas veces hemos visto todas zanjas abiertas en las calles de Madrid de las que sacan los obreros tuberías de hierro agujereadas y hasta carcomidas cubiertas de fango negruzco (Sulfuro de hierro) y con fuerte olor a SH_2 y qué pocos piensan que esa destrucción ha sido debida a las bacterias que producen SH_2 !

Además de las bacterias sulfato-reductoras, también pueden producir SH_2 las bacterias de la putrefacción a expensas del azufre contenido en las proteínas, principalmente en forma de cisteína, cistina, etc.).

En Wadi Natrum (Egipto) hay depósitos de CO_3Na_2 (*natrón*) en cuya formación han intervenido también las bacterias sulfato-reductoras, que han convertido al sulfato sódico presente en las aguas en sulfuro sódico, que por la acción del CO_2 y del agua ha pasado a carbonato sódico.

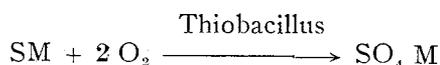
El Dr. Abd-el-Malek ha estudiado la génesis del yacimiento de Wadi-Natrum y ha confirmado esa hipótesis. Recordemos que los egipcios introducían los cadáveres de personas y de ciertos animales previamente desviscerados y descerebrados en los lagos de Natrón antes de embalsamarlos para convertirlos en momias.

Y trasladémonos a Camboya, donde Pochon y sus colaboradores

de los Institutos Pasteur, de París y de Camboya (1), han realizado investigaciones sobre la alteración de las piedras y degradación de los famosos templos de Angkor emplazados en zona templada y húmeda y han dado la siguiente interpretación: en las capas inferiores de los monumentos los sulfatos del suelo se reducen por *Desulfovibrio* a sulfuros y sulfhídrico, que ascienden con el agua por capilaridad por el muro y, allí donde las condiciones son favorables, se oxidan por las bacterias sulfo-oxidantes *Thiobacillus*, y se forma sulfúrico que ataca al carbonato cálcico de la arenisca y se forma sulfato cálcico (yeso) más soluble en el agua que el carbonato y poco a poco el templo se va desmoronando.

En 1978 se ha publicado en los Estados Unidos de N. A. por los Dres. L. E. Murr, A. E. Torma y J. A. Brierly un interesante libro titulado *Metallurgical applications of Bacterial Leaching and related Microbiological Phenomena* de cuya lectura se deduce que está naciendo una nueva disciplina: la *Biohidrometalurgia*. En dicho libro se destacan la misión desempeñada por ciertos microorganismos en la cinética de los procesos de lixiviación y otras aplicaciones metalúrgicas.

La lixiviación bacteriana de sulfuros metálicos puede considerarse como un proceso bioquímico realizado por especies microbianas del género *Thiobacillus* y puede resumirse así:



y así se solubiliza el metal al formarse sulfato.

El *Thiobacillus ferrooxidans* es *quimiolitotrófico* (término propuesto ya en 1888 por Winogradsky) es el microbio más corrientemente empleado para la recuperación de ciertos metales. Se estima que el 5 por 100 de la producción mundial de Cu está basada en la solubilización y lixiviación del metal de minerales de bajo grado.

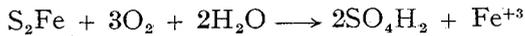
Chakrabarty, de la General Electric Co. Schenectady (N. Y.), refiriéndose al *Thiobacillus ferrooxidans* dice lo que sigue:

This bacterium is capable of releasing more than 90 % of copper from common sulfide ores such as chalcopyrite or chalcocite. In addition Thiobacillus ferrooxidans has been shown to affect solubiliza-

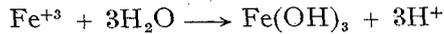
(1) J. POCHON y col.: *Degradation des temples d'Angkor et processus biologiques*. A. I. P. T., 98, págs. 457-461 (1960).

tion and release of such important metals as U, Co, Ni, Zn and Pb.

P. R. Dugan y W. A. Apel, de The Ohio State University, en su trabajo «Microbiological Desulfurization of Coal», utilizan el *Thiobacillus thiooxidans* para oxidar las piritas contenidas en carbones, pues cataliza la oxidación del sulfuro de hierro a sulfúrico y Fe^{+3} y éste reacciona con el agua para producir hidróxido férrico y aumento de acidez



y



Dicen los citados investigadores:

It can be concluded that microorganisms effectively remove pyritic sulfur from coal via oxidation and solubilization in laboratory scale experiments, thereby demonstrating the potential for commercial scale operation.

Dentro de esta rama de la *biometalurgia* no sólo se emplean bacterias sino también mohos. Así en la Universidad de Cagliari (Italia), G. Rossi, para recuperar el K de la *leucita*, emplea los siguientes mohos: *Aspergillus niger*, *Scopulariopsis brevicaulis* y *Penicillium expansum* y consigue lixiviar del 21 al 27 por 100 del K, resultando el más eficaz en ese proceso el *Scopulariopsis brevicaulis*.

Dado el aumento en la demanda mundial de metales, y pensando en que seguirá aumentando en el futuro, es necesario prestar la debida atención al aprovechamiento de minerales pobres, de baja graduación. Y miren por dónde la Microbiología está prestando, y va a prestar, un gran servicio a la Metalurgia, pues se concede actualmente gran importancia a la lixiviación por vía microbiana, proceso que resulta económico y no produce contaminación.

En varios libros he leído la referencia de que en suelos ricos en Hg (suelos volcánicos de Bohemia) la planta cariofilácea *Holosteum umbelatum* tiene gotitas de mercurio metálico en sus frutos (cápsulas). Dicha plantita es muy corriente en Madrid y sus alrededores y pienso que puede ser interesante investigar si existe esa planta en la zona de Almadén —cosa probable— y tratar de averiguar si contiene mercurio metálico.

No dudo que las tierras de Almadén y de localidades próximas contengan cifras de mercurio superiores a aquellas tierras alejadas de los yacimientos de cinabrio.

Por la facilidad de volatilizarse del mercurio, la atmósfera de esa zona debe también ser más rica en Hg que el aire de una zona alejada de esas minas.

Ya en 1966 en la «Revista de Sanidad e Higiene Públicas» (t. 40, págs. 325-6) publicaron el Dr. M. Mingo Fernández y sus colaboradores, P. Anechima Catalán y B. Sánchez Fernández, de la Escuela Nacional de Sanidad, *Un caso de contaminación atmosférica por mercurio*, trabajo interesante en el que dieron cuenta de haber investigado el contenido en mercurio en la atmósfera de Almadén no en las minas, sino en toda la población. De dicho trabajo tomo las siguientes líneas:

En términos generales puede decirse que el ambiente atmosférico de Almadén presenta una real contaminación hidrargírica. Los niveles encontrados son importantes y se extienden a toda la población, lo que constituye una constante contaminación atmosférica por mercurio, fuera de un recinto cerrado, en una ciudad, lo cual constituye probablemente un caso único en el mundo.

Creo que merecería la pena de investigar a fondo la flora natural de esa zona de Almadén para ver si entre la vegetación espontánea hay *especies endémicas* adaptadas a vivir en ese ambiente mercurial y también sería interesante averiguar el contenido en mercurio de las plantas cultivadas en Almadén y sus alrededores.

El 3 de agosto de 1978 publicaron en «Nature» los Dres. J. Kozuchowski y D. L. Johnson, de Syracuse (New York), un trabajo titulado *Gaseous emissions of mercury from an aquatic vascular plant*, en el que daban cuenta de la emisión de mercurio por una planta muy común *Phragmites communis* (carrizo) que crecía en las orillas del lago Onondaga (contaminado por Hg). La emisión de mercurio elemental se efectuaba a la luz y no había dicha emisión en la oscuridad cuando los estomas de la planta están cerrados, y señalaron la existencia de una relación entre la emisión de mercurio, la transpiración y la fotosíntesis.

A continuación transcribo de dicho trabajo las siguientes líneas:

Hence, vascular plants may play an important part in the removal of mercury from soils and sediments by injecting it directly to the atmosphere. Further, our results show that the extent of these emissions is related to the concentration in the substrate and the diurnal pattern of the plants physiological processes.

Desde el punto de vista de la mineralogénesis las bacterias sul-

fato reductoras han contribuido a la formación de algunos depósitos de sulfuros metálicos. Ya en 1895 Murray e Irvine atribuyeron la formación de sulfuro ferroso en fangos marinos a la actividad de las bacterias sulfato-reductoras, e Issatschenko (1929) estimó que la formación de pirita en el Mar Negro y en el Mar de Azof era también debida a la intervención de esas bacterias.

Ya he señalado anteriormente que los *Desulfovibrio* son bacterias anaerobias obligadas y que abundan en el mar y muy especialmente en los fangos de los sedimentos marinos. El Dr. C. E. Zo-Bell se ha ocupado muy especialmente del estudio y misiones de las *Desulfovibrio* en el mar y en los depósitos marinos (1).

Aunque el proceso o los procesos de formación de petróleos a partir de material planctónico han debido de ser complejos y en ellos han intervenido procesos físico-químicos y bioquímicos, además de catálisis por contacto con participación de la presión y del calor, no se duda que las bacterias sulfato-reductoras han debido participar no sólo en las primeras etapas de la formación de los petróleos, sino también en la migración de los productos petrolíferos de antiguos sedimentos marinos liberando aceite mineral de materiales que los contienen y promoviendo su flujo.

Son muchos los minerales y rocas de origen biológico, pues aparte del azufre y SH_2 de origen no volcánico, ciertos sulfuros, sulfatos y carbonatos, los petróleos y carbones, mencionaré el ámbar, el nitrato sódico de Chile, el nitrato potásico de las nitrerías, los guanos, los óxidos e hidratos de hierro (ocres) que se producen en las aguas ferruginosas por la acción de las bacterias ferruginosas, la diatomita formada por la acumulación de las frústulas de diatomeas, depósitos de fosfatos, las calizas de distintos tipos (coralinas, conchíferas, de nummulites, de equinodermos, creta, tobas calizas, etc.) y los fangos de globigerimas, de radiolarios o de diatomeas que se acumulan actualmente en los fondos marinos, etc. Probablemente los sedimentos oceánicos de mayor interés, al menos desde el punto de vista económico, son los nódulos de manganeso que deberían llamarse *nódulos polimetálicos* porque además de contener Mn contienen también Fe, Ni, Co y Cr. Abundan principalmente en el océano Pacífico y siguen formándose en la actualidad, y el doctor H. L. Ehrlich, en su trabajo *Microbial participation in the genesis*

(1) C. E. ZO-BELL: *Bacterial activities and the origin of Oil*. World Oil, V-130, págs. 128-130, junio 1950.

of Mn, nodules, que presentó al VIII Congreso Internacional de Microbiología, dice que, con las debidas precauciones para evitar contaminaciones, aisló de nódulos de Mn diversas bacterias *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, etc., y manifestó que los iones de Mn de las aguas marinas son adsorbidos por los nódulos de Mn y otros adsorbentes y las bacterias convierten al ion de Mn en óxido, que fija más iones de Mn que son oxidados a su vez y así van creciendo dichos nódulos.

Es sorprendente, pero está demostrado por el examen microscópico, que los jaspes de *Radiolarios* están formados por las estructuras silíceas de esos Protozoos y el *sillex de la creta* o piedra de fuego, el primer material utilizado por el hombre prehistórico para fabricar sus instrumentos cortantes, es también de origen biológico.

Parte del CO₂ de la atmósfera procede de los organismos aerobios como consecuencia de sus procesos respiratorios, y también parte procede de fermentaciones tales como la fermentación alcohólica producida por las levaduras.

El mismo oxígeno del aire, tan necesario para la vida aerobia, es en su mayor parte de origen biológico. Fueron las plantas las que merced a sus cloroplastos y con el concurso de la luz fotolizaron el agua con producción de oxígeno y de hidrógeno, necesario para la reducción del CO₂ y síntesis de hidratos de carbono y otros compuestos orgánicos.

Los ciclos del C, O, N, S y P en la naturaleza están íntimamente ligados a los procesos biológicos, y no olvidemos que hay íntima relación entre algunas sustancias minerales y plantas verdes, pues éstas se alimentan de sales minerales que absorben de los suelos y de las aguas terrestres y marinas, y que con el concurso de la energía solar realizan, como diría el insigne polígrafo aragonés Joaquín Costa: *el milagro de transformar las piedras en pan*.

Ofrece interés conocer las relaciones entre el mundo vegetal y el mineral, y recordar que existen *plantas acumuladoras de ciertos elementos* tales como Zn, Cu, Se y otros.

Entre las plantas que viven en terrenos ricos en Zn, y son excepcionales por su tolerancia a dicho metal, mencionaré: *Viola calaminaris*, *Armeria maritima*, *Thlaspi alpestre* var. *calaminaria*, plantas de cuyas cenizas se puede obtener cinc.

El profesor checo Němec presentó en una reunión de biólogos, hace muchos años, una pepita de oro que había obtenido de las cenizas

zas de *Equisetum palustre* recogido sobre terrenos volcánicos de Eslovaquia.

Hay plantas indicadoras de terrenos ricos en cobre. La labiada *Acrocephalus Roberti* que soporta elevadas concentraciones de cobre en los suelos, y otra labiada *Ocimum homblei* que sólo crece en terrenos cuya concentración en Cu sea superior a 100 partes de cobre por millón. La primera en Katanga y la segunda en Rodesia han servido para señalar nuevos yacimientos de minerales de cobre.

También existen plantas indicadoras de selenio y acumuladoras de dicho elemento. Pertenecen a los géneros *Astragalus*, *Lathyrus*, *Xylorrhiza*, *Oönopis* y *Stanleya*, y de ellas se puede extraer selenio que tanto interés industrial tiene.

El profesor Dr. Carlos López Bustos es quien más se ha interesado en nuestra patria por las plantas seleníferas y la intoxicación producida por ellas. Según él el *Astragalus lusitanicus* abunda en la zona oeste de la provincia de Ciudad Real y debe ser rico en selenio ya que produce intoxicaciones en el ganado semejantes a las que producen los *Astragalus* en Estados Unidos.

La Dra. Helen L. Cannon, en su documentado trabajo con amplia bibliografía *Botanical Prospecting for Ore Deposits (How plant chemistry is used to aid the geologist in his search for metals at home and abroad)* («Science», Sep. 2, 1960, vol. 132, págs. 591-598), presenta una fotografía del *Astragalus Thompsonae* y señala que es planta indicadora de selenio y uranio en Utah (U. S. A.). Sería interesante que se estudiara con detenimiento el contenido en selenio y en uranio (?) del *Astragalus lusitanicus*.

El profesor Calvo en su discurso hace referencia a la enfermedad de Minamata, intoxicación producida por compuestos órgano-mercuriales originados por la acción de bacterias presentes en los sedimentos de fondo o en el pescado en descomposición y que transforman el mercurio inorgánico en metilmercurio soluble en el agua, o en el dimetil-mercurio volátil, y ambas sustancias son muy tóxicas.

Esta alusión del profesor Calvo a la intoxicación por órgano-mercuriales me mueve a tratar muy brevemente sobre este particular de especial interés para científicos y sanitarios del mundo entero, especialmente sensibilizados por las tragedias humanas ocurridas no hace muchos años en Minamata (Japón), Irak y otros países.

La contaminación mercurial de la atmósfera y de las aguas continentales y marinas es una realidad y, además, va en aumento. La

combustión de carbones y petróleos crea un ambiente mercurial. En cada disparo o explosión en que el detonador es el fulminato de mercurio se marcha algo de mercurio a la atmósfera. Recordemos que Nobel, el inventor de la dinamita, utilizó el fulminato de mercurio como detonador de preferencia para su dinamita.

El mercurio se vaporiza a temperaturas normales y pasa a la atmósfera y los vapores de mercurio son rápidamente absorbidos por inhalación. En zonas donde se extrae el cinabrio, o donde se obtiene el mercurio, o en industrias que operan con el hidragirio puede aumentar considerablemente el mercurio en la atmósfera poniendo en peligro la vida de los que trabajan en esos recintos. Una de las aplicaciones más importantes del mercurio en la industria es en las celdas electrolíticas —*proceso Castner-Kellner*— para obtener cloro y sosa caústica por electrólisis de una disolución de cloruro sódico en celdas donde el mercurio hace de cátodo que se desplaza. El mercurio conduce la electricidad y en el cátodo se forma sodio que se amalgama con el mercurio; esta amalgama se conduce a celdas donde con agua pura se produce la sosa caústica o hidróxido sódico y queda libre el mercurio. El cloro se produce en el ánodo. Pues bien, en este proceso hay pérdidas relativamente importantes de mercurio que van a la atmósfera.

El mercurio metálico ingerido por vía oral en cantidades hasta de 1 kg. para resolver una obstrucción intestinal no produce síntomas de toxicidad siempre que el tubo digestivo esté intacto (L. J. Goldwater, *Mercury. A History of quicksilver*, 1972). La penetración por la piel de vapores de mercurio como ocurría cuando se empleaba la *pomada mercurial* en exceso en el tratamiento de la sífilis o las inhalaciones de vapores de mercurio, producían intoxicaciones tales como: neumonitis crónica, temblor mercurial, gingivitis, encías sangrantes, movilidad de los dientes, aumento de saliva, sabor metálico, dolores de cabeza, insomnio, etc., como consecuencia del aumento del nivel de mercurio en sangre, debido a la absorción cutánea y por la vía respiratoria.

A partir de los años 1909 y 1912 cuando Ehrlich introdujo el *Salvarsán* y el *Neosalvarsán*, y muy especialmente a partir del 1943 cuando introdujo Maloney en U. S. A. como medicamento antisifilítico la *Penicilina*, se suprimió totalmente la medicación mercurial para el tratamiento del *morbis gallicus*.

El cloruro mercúrico o *sublimado corrosivo* fue introducido en

1881 por Roberto Koch, el descubridor del bacilo causante de la tuberculosis, como germicida local con ventajas, se decía, sobre el ácido fénico utilizado por Lister; pero ya no se usa como antiséptico dicho cloruro mercuríco que ingerido es un violento veneno. Muchos suicidios se han cometido por ingestión de uno a dos gramos de sublimado corrosivo que producía corrosión del esófago y estómago, con vómitos, diarrea y hemorragias y con daño grave para los túbulos renales, con albuminuria, anuria, uremia y muerte. A partir del 1914 se emplea como germicida superficial la *sal sódica del 2-7 dibromo 4 hidroximercurio-fluoresceína (mercurocromo)*, de actividad antiséptica moderada, pero su buena reputación parece estar ligada a su coloración.

El episodio de Minamata, en la costa SO de la isla Kyushu (Japón) se presentó a finales de 1953. Primero se observó que muchos gatos tenían temblores, danzaban y terminaban por arrojarse al mar. Después se observó que ocurría esto mismo en aves, cerdos y perros. Pero cuando cundió la alarma fue cuando miembros de una familia de pescadores ofrecían síntomas de una enfermedad rara; pero los familiares lo mantuvieron callado. En 1956 la señora Watanabe llevó a su hija de seis años, Matsuyio, a la clínica del Hospital de la Shin Nihon Chisso Co. (1), importante fábrica de productos químicos en Minamata. Los médicos que la examinaron concluyeron que padecía una afección del sistema nervioso central, pero no pudieron concretar la causa. Una semana después un hermanito de Matsuyio enfermó y, poco después, cuatro enfermos más fueron admitidos en el hospital. Se les aisló porque creyeron los médicos que pudieran padecer la *Encephalitis japonica* aunque no tenían fiebre y los síntomas de la enfermedad se desarrollaban con más lentitud; la designaron con el nombre de *enfermedad de Minamata*.

En agosto de 1956 los clínicos de la Facultad de Medicina de la Universidad de Kumamoto, localizada en la isla de Kyushu, se encargaron de investigar las causas y tratamiento de la enfermedad. El número de afectados se fue elevando y siempre entre la población de pescadores o sus familiares, cuya alimentación era a base de pescados y moluscos que se cogían en las aguas de la bahía de Minamata.

Se pensó que en las aguas de la bahía habría algún tóxico que se

(1) P. A. D'ITRIA and F. M. D'ITRIA: *Mercury contamination a Human Tragedy*, 1977.

acumulaba en los peces y moluscos. ¿Sería la Chisso Co. la fuente de contaminación? Dicha empresa fabricaba etanal por hidratación del acetileno, proceso que era catalizado por una sal inorgánica de mercurio (sulfato). Después se supo que el proceso marchaba con pobre rendimiento pues se perdían de 500 a 1.000 g de mercurio por tonelada de etanal fabricado. Las aguas residuales de esa fábrica se vertían con su elevado contenido en mercurio a la bahía de Minamata donde se acumulaba en los fangos marinos.

Pero los directores de dicha empresa al principio negaban que fueran ellos los contaminantes porque los síntomas que presentaban los enfermos de Minamata no coincidían con la intoxicación mercurial clásica por mercurio inorgánico, tales como gingivitis, dientes sueltos, sialorrea, temblores, etc.; los síntomas de los pobres pescadores y familiares de Minamata revelaban degeneración del sistema nervioso central con trastornos de la visión, sordera y pérdida de sensibilidad en las extremidades, etc., en los casos graves, con elevado número de muertes.

Se sospechó, con fundamento, que los vertidos de esa fábrica contenían mercurio en cierta forma que podría ser la causa de la enfermedad. Sería el mercurio inorgánico metilado por microbios en su viaje a las aguas de la bahía para luego acumularse en los sedimentos donde continuaría un proceso microbiano anaerobio. Por fin, en 1968, se descubrió que en el efluente de la fábrica también había poca cantidad de *metil-mercurio* con lo cual la fuente y la vía de contaminación quedó definitivamente esclarecida, aunque también las bacterias presentes en los sedimentos de fondo de la bahía podrían convertir el Hg inorgánico en *metil-mercurio*, soluble en agua, y en *dimetil-mercurio*, volátil.

En febrero de 1969 se extrajo de moluscos recogidos en la bahía un compuesto cristalizado, el *dimetil-mercurio*, con un átomo de azufre ($\text{CH}_3\text{—Hg—S—CH}_3$). Se le dio a gatos y se les indujo los mismos síntomas que en la enfermedad de Minamata.

Cuando se analizaron peces y moluscos de la bahía se averiguó que contenían cifras tan altas en Hg que revelaban que habían concentrado de 5.000 a 50.000 veces el contenido de Hg en el agua del mar.

Las investigaciones en personas afectadas de la enfermedad de Minamata revelaron elevado contenido de Hg en el cabello, sangre

y orina. Por ejemplo, en el cabello de 300 a 700 ppm en tanto que en el cabello de individuos normales sólo era de 1 a 3 ppm.

Las autopsias de individuos fallecidos a consecuencia de la enfermedad de Minamata, revelaban que el tóxico se acumulaba preferentemente en el cerebro, hígado y riñón. Hoy se sabe que los *alkilmercuriales* tienen gran afinidad por los tejidos ricos en lípidos y por eso se acumulan preferentemente en el sistema nervioso central donde ejercen su acción tóxica. El diagnóstico de intoxicación por metilmercurio se confirmó cuando se compararon los cambios patológicos en el cerebro con los datos que había en la literatura de un individuo que murió en 1954, catorce años después de ser intoxicado cuando fabricaba alkilmercuriales.

En el episodio de Minamata de 1953 a 1960 hubo unos 121 enfermos afectados, muriendo 46 de ellos. Luego hubo otros episodios en el Japón como el de Niigata en la isla de Honshu, etc.

El episodio más catastrófico fue el de Irak en 1971 y comienzos del 1972, con 6.530 casos hospitalizados y de ellos 439 casos de muerte por comer pan fabricado con harinas procedentes de granos tratados con fungicidas metilmercuriales tales como el acetato de metilmercurio, el metilmercurio 2-3 hidroxipropilmercáptido, y metilmercurio diciandiimida. Los sacos donde estaba ensavado el grano tratado llevaban en la portada la calavera y las dos tibias cruzadas y el letrero con la palabra *Danger* en árabe. Ese grano estaba destinado exclusivamente para siembra y estaba coloreado en rojo-pardo, pero como el colorante era eliminado por lavado, me figura que los usuarios tendrían la impresión de que el tóxico había sido eliminado. Los que lo emplearon para panificación o no entendieron lo de la calavera y las tibias o padecían mucho hambre (1).

F. Bakin y otros siete investigadores de la Universidad de Bagdad y el Dr. F. W. Clarkson y otros dos colaboradores de la Universidad de Rochester, publicaron en 1973 su trabajo *Methyl-Mercury Poisoning in Iraq* («Science», V, 181, pág. 230, 1973), en el cual manifiestan que la epidemia fue debida al consumo de compuestos metilmercurícos contenidos en las harinas.

En el tratamiento de los enfermos se emplearon en Irak diversas sustancias con grupos tiólicos que se ligan fácilmente con el Hg.

(1) También se dieron casos de intoxicación en animales domésticos alimentados con cebada que había sido tratada con los metilmercuriales, y, por lo tanto, sus carnes también estaban contaminadas y el Gobierno iraquí prohibió su venta.

tales como el *BAL* de los ingleses o *2-3-ditio-propanol I*, la *d-penicilamina*, el *N-acetil d-l penicilamina* (siendo la penicilamina la β - β -dimetil cisteína) y una resina tiólica, *Polystyrene sulphhydryl resin I7-B*. Con ninguna de esas sustancias se pudo reparar el daño producido por el tóxico, pero por sus grupos SH que se ligan con el Hg, se conseguía, al menos en algunos de los tratados, acelerar la eliminación de los metil-mercuriales y disminuir la gravedad de la intoxicación.

Intoxicaciones parecidas a las del Irak también se dieron en otros países tales como Guatemala y Pakistán.

A partir de 1950, se utilizó en Suecia el antifúngico *acetato de fenilmercurio* en la industria de pastas de celulosa y de papel para evitar el desarrollo de masas viscosas fúngicas que deterioran a la celulosa. Las aguas residuales iban a parar a lagos, canales y ríos, y se dieron casos de contaminación en aves y peces y hasta en personas que comían —sin saberlo, claro está— peces contaminados. También como consecuencia de sus instalaciones electroquímicas para la obtención de cloro y sosa cáustica por el procedimiento de Castner-Kellner, vertían las aguas residuales que contenían mercurio a lagos y ríos y también se originaron intoxicaciones. Todo ello motivó grandes preocupaciones en las autoridades sanitarias suecas y se prohibió la pesca en gran número de lagos y ríos, y se suprimió el empleo de fenil-mercuriales en el proceso de fabricación de pastas de celulosa.

Ya he señalado que la transformación del mercurio inorgánico a metil-mercuriales (mono y dimetil mercurio) es obra de bacterias presentes en los sedimentos. Esos metil-mercuriales son más móviles que el mercurio inorgánico y, por lo tanto, su toxicidad es también mayor.

En Suecia, en el pez de agua dulce *lucio* (*Esox lucius*), se han hallado a veces cantidades elevadas de mercurio bajo forma de metilmercurio.

El proceso de biometilación de metales y metaloides es del mayor interés.

Los investigadores suecos S. Jensen y A. Jermelöv, en su trabajo *Biological methylation of Mercury in aquatic organisms* («Nature», v. 223, pág. 753, 1969), demostraron experimentalmente en acuarios que los sedimentos de fondo contenían bacterias capaces de me-

tilar al Hg formando el monometil y el dimetil mercurio y que también en el pescado en descomposición se produce ese fenómeno.

Se sabe que la *metilcobalamina* ($\text{CH}_3\text{-CO-5-6-dimetil benzimidazolcobamida}$) es un metil dador en reacciones de transmetilación (J. M. Wood y colaboradores, *Mechanisms for the biomethylation of metals and metalloids*, Federation Proceedings, vol. 37, n.º I, January 1978, p. 16).

Es interesante recordar que cuando se empleaba el *arsenito de cobre* (verde de Scheele) para colorear de verde a los papeles empleados para empapelar habitaciones, se daban casos de intoxicación a veces grave. Ello era debido a la acción reductora de ciertos mohos, que en las habitaciones empapeladas y húmedas se desarrollaban sobre el engrudo utilizado en el empapelado y producían a expensas del verde de Scheele un gas tóxico de olor aliáceo al cual se le llamó por entonces *gas de Gosio*, pues fue B. Gosio, médico sanitario italiano, quien aisló en 1893 el moho *Scopulariopsis brevicaulis* causante de la reducción del arsenito de cobre empleado en la pintura de los papeles. Por entonces se creyó que el gas de Gosio era *arsenamina*, pero en 1935 se identificó a dicho gas como la *trimetilarsina* (F. Challenger and C. Higginbottom, *The production of trimethylarsine by Penicillium brevicaulis (Scopulariopsis brevicaulis)*, «Bioch. Journal», 9, 1757-1778-1935). El 11 de julio de 1961 visité al distinguido micólogo Dr. George Smith en el *London School of Hygiene and Tropical Medicine* quien, amablemente, me facilitó un cultivo de *Scopulariopsis brevicaulis* y me aconsejó que lo cultivara en medio para mohos pero solidificado con gelatina, y que no necesitaba adicionar cacodilato, ya que las cantidades mínimas de arsénico presentes en la gelatina eran suficientes para que el moho las metilara y se identificara la *trimetilarsina* formada por su penetrante olor aliáceo. Así lo hice y pude comprobar por la técnica que me indicó el Dr. G. Smith que a expensas de los indicios de arsénico presentes en la gelatina, el *Scopulariopsis brevicaulis* los transformaba en trimetilarsina.

En estos últimos años se ha investigado intensamente en relación con las intoxicaciones producidas por los mercuriales orgánicos. El progreso científico es lento, pero un descubrimiento prepara el camino para otros descubrimientos, aunque el descubrimiento de toda la verdad nunca es definitivo porque siempre van surgiendo problemas «incógnitas», y como dijo el ilustre filósofo y poeta corbodés Séneca:

Multum adhuc restat. Hay que trabajar y seguir trabajando con entusiasmo para dilucidar el mecanismo íntimo de la acción de los derivados mercuriales orgánicos a nivel molecular. ¿Bloqueo de las enzimas con grupos sulfidrílicos? Ya lo dijo Emerson: «El descubrimiento de la verdad es incompatible con el reposo», y agregó: *Take which you please, you can never have both.*

Y para terminar sólo me resta decir que la antorcha luminosa del entusiasmo por la investigación y por la docencia que recibió de su insigne maestro D. Emilio Jimeno sigue ardiendo con luz inmarcesible en la Cátedra de Metalurgia de nuestra Facultad de Ciencias, en la Complutense, y que el profesor Calvo la entrega todos los cursos a sus discípulos, con el mandato de que la mantengan siempre ardiendo como una deuda de gratitud al maestro eminente que tanto hizo por la Metalurgia científica en nuestra patria y en pro de nuestra Universidad.

En nombre de mis compañeros de esta Real Academia de Ciencias y en el mío propio felicito y doy la bienvenida más efusiva al profesor D. Felipe Calvo en este día de júbilo para él y también para esta Corporación, y quiero expresarle nuestro deseo de que su vida entre nosotros sea muy dilatada y fecunda, al servicio de la Ciencia, de la Universidad y de esta Real Academia.

INDICE

	Págs.
Presentación	7
Introducción	11
Primeras reflexiones	13
Alberto Magno	16
Biringuccio	18
Georgius Agricola	20
Alonso Barba	23
Plutonistas y Neptunistas	27
El actual entendimiento	28
Las concentraciones localizadas de metales	34
Ideas genésicas	37
La actualidad Neptunista	39
La actualidad Plutonista	49
La tectónica de placas y la mineralización	52
Comentarios a la acción mineralizante dentro de la tectónica de placas	59
El yacimiento de Almadén	62
Aspectos geológicos	62
Hipótesis y teorías genésicas	68
Sublimación	68
Impregnación hidrotermal epigenética	68
Termosifónico	70
Chimeneas volcánicas	71
Sedimentario	71
Nuestra interpretación	86
Bibliografía más importante consultada	90
Figuras.	
Contestación	93