

# El papel de la Cristalografía en los estudios de Historia Natural

## The role of Crystallography in Natural History

Juan Manuel García Ruiz

*Laboratorio de Estudios Cristalográficos. Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra. CSIC-Universidad de Granada.*

**PALABRAS CLAVE:** Cristalografía, Historia de la Cristalografía, Historia Natural, Mineralogía, Biología Estructural.

**KEY WORDS:** Crystallography, History of Crystallography, Natural History, Mineralogy, Structural Biology.

### RESUMEN

Este trabajo analiza las contribuciones realizadas por científicos españoles u extranjeros publicadas en el *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* (desde 1901 hasta la creación de la Sociedad Española de Cristalografía en 1950) y en sus antecesoras, los *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural* (1872-1901), los *Anales de Historia Natural* (1799-1801) y los *Anales de Ciencias Naturales* (1802-1804). Durante esos ciento cincuenta años no existen contribuciones conceptuales o experimentales suficientemente significativas que hayan tenido un fuerte impacto en la historia de esta disciplina. Sin embargo, se puede constatar que los cristalógrafos españoles venían de tener una base minera y mineralógica (oritognóstica) extraordinaria y gozaban de una preparación técnica envidiable, gracias en parte a los continuos viajes de formación, especialmente a la Universidades e Instituciones de la escuela germana. Esa interacción con Alemania fue especialmente intensa durante los dos períodos en los que se produce un cambio de rumbo en la Cristalografía: el primero desde la oritognosis werneriana a la cristalografía morfológica de Romé de L'Isle y la teoría reticular de Haüy en el tránsito del XVIII al XIX y el segundo cuando el descubrimiento de la difracción de rayos X por los cristales confirma la naturaleza reticular del cristal y permite el conocimiento detallado de la estructura molecular de la materia, abriendo paso al nacimiento de la Cristalquímica y la Cristalofísica. Habida cuenta de los distintos resultados de esas dos contiendas intelectuales para la escuela germana, la ventura española fue también desigual. En opinión del autor estas dos –morfogénesis e información molecular– son precisamente las aportaciones de la Cristalografía que más influencia han tenido y van a seguir teniendo en los estudios de Historia Natural.

### ABSTRACT

This work is an analysis of the contributions on crystallography published by Spanish or foreign people in the *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* (since 1901 until 1950 when the Sociedad Española de Cristalografía is created). Contributions published in the preceding sister academic journals, such the *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural* (1872-1900), the *Anales de Historia Natural* (1799-1801) and the *Anales de Ciencias Naturales* (1802-1804) are also evaluated. No significant conceptual or experimental contributions were performed during these 150 years that could be claimed to have significantly contributed to the history of Crystallography. However, it is clear that the Spanish crystallographers had an excellent background on mineral processing and mineralogy (oritognosis) and they had an enviable expertise in mineralogical and crystallographic technologies, mostly due to the scientific stages and cooperation with foreign Institutions, particularly Universities and laboratories of the German school. This interaction with Germany was especially strong during the two critical periods when Crystallography change the conceptual course: the first –at the end of eighteen century and beginning of nineteen century– from the Wernerian oritognosis to the morphological crystallography of Romé de L'Isle and the molecular theory of Haüy; and the second after the discovery in 1912 of the diffraction of X-ray by crystals, which confirm the reticular hypothesis and allows the birth of Crystallochemistry and Crystallophysic. Considering the two different consequences of these two intellectual battles for the German school, the Spanish fortune was also unequal. It is claimed that these two subjects –morfogenesis e molecular information– were also the two most significant contributions of the Crystallography to the studies of Natural History and they still will furnish our science in the future.

## 1. INTRODUCCIÓN

Cuando nuestro querido editor Antonio Perejón me solicitó un artículo para el volumen que se convertirá en el número cien del *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* no dudé en aceptar orgulloso el encargo, sobre todo a la vista del título sugerido: “El papel de la Cristalografía en los estudios de Historia Natural”. Me pedía Antonio realizar un repaso de las contribuciones que la Cristalografía haya podido realizar a las distintas facetas de las Ciencias Naturales, haciendo especial énfasis en las aportaciones publicadas en nuestro *Boletín*. Quizás convenga empezar afirmando que –en mi opinión– las aportaciones más valiosas que la Cristalografía ha realizado a los estudios de Historia Natural han sido dos y ambas de similar y enorme trascendencia. La primera de ellas, una teoría sólida para explicar el comportamiento morfológico del mundo mineral y la segunda, una teoría reticular para la estructura de los cristales que además sirvió y sirve como herramienta inigualable para revelar la estructura molecular de la materia (“organizada” e “inorgánica”<sup>1</sup>). No me olvido de otras contribuciones, como la teoría de la cristalización, la óptica cristalográfica, la teoría de la simetría, la teoría de defectos reticulares y comportamiento mecánico de materiales, la pizeo y piroelectricidad, el enantiomorfismo, y tantos logros de gran importancia, que sin embargo pueden ser englobados como resultado o consecuencia secundaria de aquellas dos contribuciones fundamentales.

Vamos pues a analizar el origen de esas dos contribuciones en el contexto de las publicaciones de la cristalografía española desde la edición de los *Anales de Historia Natural* allá por 1799. Quisiera adelantar al lector que éste no es un artículo de Historia de la Ciencia en el sentido estricto del término. No he utilizado fuentes documentales no publicadas o inéditas ni creo que haya suficientes datos novedosos que merezcan reclamar para estas páginas esa calificación. Para los aspectos

historiográficos y biográficos me he podido apoyar en los excelentes trabajos publicados por diversos colegas, que he leído con fruición y que aparecen citados en su debido momento. Dejo pues ese estudio histórico de la cristalografía española para cuando corran tiempos mejores, es decir cuando disponga de él. Así pues, lo que sigue puede y debe leerse como un análisis en el contexto histórico internacional de los estudios cristalográficos publicados en los *Anales de Historia Natural* (1799-1801), en los *Anales de Ciencias Naturales* (1802-1804) y en el *Boletín de la Sociedad Española de Historia Natural* (desde 1872-1901) y en nuestro *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* desde 1900 hasta la creación de la Asociación Española de Cristalografía en 1950. La razón de finalizar el análisis en ese momento es porque a partir de entonces, cuando la Cristalografía se organiza como una disciplina científica de importancia estratégica y desde luego desde la internacionalización de la ciencia española a partir de 1980, ni lo publicado en nuestro *Boletín* ni en ninguna revista de índole nacional puede considerarse representativo de lo que se hace en la Cristalografía de un determinado país.

## 2. LA MORFOLOGÍA DEL MUNDO MINERAL Y EL ORDEN DE LOS SISTEMAS NATURALES

Cuando ven la luz los *Anales de Historia Natural* en 1799, el centro neurálgico de la mineralogía mundial estaba situado en Freyberg, Sajonia, a cuya entonces famosa Escuela de Minas acudían un gran número de estudiantes atraídos por el prestigio como científico, como minero y como orador de Abraham G. Werner. Uno de ellos fue Christiano Herrgen, que compartió allá aula e inquietudes con los estudiantes de minería españoles Andrés del Río y Fausto de Elhuyar y con el naturalista Alexander von Humboldt<sup>2</sup>. Seguidor convencido de Werner, Herrgen, creía que la Mineralogía hacia uso

<sup>1</sup> Utilizo estos términos en el sentido de la literatura científica del siglo XVIII. Por ejemplo, HERRGEN (1802: 3) hablando de los minerales como “*todo cuerpo inerte y sin organización y por lo mismo sin vida y sin movimiento espontáneo*” o QUADRA (1803: 9) “*las plantas y los animales se componen de partes diversas unas de otras, á (sic) quienes se llaman órganos, que son los que forman su íntima relación; los fósiles y atmosféricos son unas substancias homogéneas ó mecánicamente simples ...que aunque por medios mecánicos se haga de ellas una división infinita, siempre quedan semejantes sus partes, porque sus relaciones se encuentran en la combinación (naturalidad de las partes constitutivas)*”.

<sup>2</sup> El nacimiento de los *Anales de Historia Natural* en 1799 y su contexto cultural y científico ha sido estudiado de forma detallada por Joaquín Fernández Pérez. (FERNÁNDEZ PÉREZ, 1993), a quien también debemos el índice temático y la publicación de la edición facsímil de los veintinueve volúmenes publicados durante los cinco años de la revista (1799-1804), que a partir de 1801 (volumen

de la Oritognosia para estudiar los minerales por sus caracteres exteriores, el color, la raya, la fractura, la textura, clasificándolos por la diversidad de sus partes constitutivas (haciendo uso para ello del análisis químico) y de tal modo, “*que la serie de ellos se acerque, en cuanto sea posible, a la que parece existir en la misma naturaleza*” (HERRGEN, 1802). Pero cuando España –acertadamente se aprestaba a modernizar su minería y mineralogía con los brillantes jóvenes becados en Freiburg y cuando se contrataban (como en el caso de Herrgen) o se recibía y apoyaba (como en el caso de Humbolt) a esos convencidos wernerianos, la base del sistema de mineralogía enseñado en Freyburg se veía contestada por unas ideas –que si bien no podían considerarse originales– iban a suponer a la postre el cambio de los criterios de clasificación mineralógica y el nacimiento de la Cristalografía. Una corriente que atacaba insistentemente y esta vez, a mediados del siglo XVIII, de forma contundente con lo que a mi entender es y sigue siendo una de las dos grandes aportaciones de la Cristalografía a la Historia Natural: la interpretación de las propiedades morfológicas del mundo mineral. Frente a los aspectos físicos externos de los minerales, principal criterio de clasificación usado desde la antigüedad y que Werner había llegado a manejar magistralmente, se proponía ahora como criterio de clasificación algo objetivo, algo que podía ser medido. Esa entrada de la morfología cristalina en escena no fue ni fácil ni repentina.

Cuando Werner aún enseñaba en su cátedra de Freiburg a finales del XVIII, hacia más de 250 años que rondaba por Europa la idea de que los minerales tenían una estructura interna periódica. Vannoccio Biringuccio (1480-1540) anota claramente en su *De la Pirotechnia* (BIRINGUCCIO, 1540) que los cristales de pirita tienen forma de dados ortogonales con todas las caras iguales o con base prismática algo que el genio de Georgius Agricola (1494-1555) recoge, subraya e ilustra en su famosa *De re metallica*. Se atribuye al físico italiano Girolamo Cardano (1501-1576) esa idea, la misma que Johannes

Kepler (1561-1630) expresa y dibuja cincuenta años más tarde, sosteniendo que los pequeños copos de nieve de forma hexagonal podían ser explicados si se suponía que estaban formados por un empaquetamiento de pequeñas esferas, tal como se apilaban las balas de cañón. Erasmus Bartholinus (1625-1698) describió la doble refracción del espato de Islandia en 1669 y mide con precisión los ángulos de las caras del romboedro de calcita (BARTHOLINUS, 1669). En 1690 Christian Huygens (1629-1695) vuelve a la carga para explicar la doble refracción y la exfoliación de la calcita, proponiendo el cristal como un empaquetado de elipsoides (HUYGHENS, 1690).

Pero es el danés Nicolas Stenon (1638-1686) quien observando los cristales de cuarzo y hematites establece que independientemente del aspecto de los cristales (lo que hoy llamamos su hábito) los ángulos entre las caras son siempre los mismos. Anuncia al mundo su famoso “*non-mutatis angulis*” en la página 85, última de su obra “*De solido intra solidum*” escrita en 1669 (STENONIS, 1669) (Fig. 1). Anuncio que pasa desapercibido para la comunidad científica, aunque Domenico Guglielmini (1655-1710) volviera a comprobar la certeza de esa afirmación con la sal común y otras sales, y a explicar sus precisas formas como resultado del apilamiento de unidades elementales (*De salibus* (1705) y en su *Opera omnia* (1719)). Pero aunque durante más de cien años, estudiosos de la talla intelectual de Anton Leewenhoek (1632-1723) o Robert Hooke (1635-1703), o el propio introductor del término Cristalografía (Cappeller, 1723) y muchos otros (véase, FABIAN, 1986) observaron con sus microscopios los minerales y las sales cristalizadas y midieron con precisión los ángulos entre las caras, ninguno de ellos alcanzó a intuir la importancia de la ley anunciada por Stenon.

Mucho se ha escrito sobre la falta de éxito de esas investigaciones que llevaron a varios ciclos de olvido/redescubrimiento de la constancia de los ángulos entre las caras de los cristales. AMORÓS (1978) cree que no hubo seguidores de esos genios: que Stenon

siete) vio la luz con el nombre de *Anales de Ciencias Naturales*. Es bien conocido que aquella aventura editorial fue debida al empeño de cuatro científicos: Christiano Herrgen, Antonio José Cavanilles, Domingo García Fernández y Louis Proust. De ellos, sin designar las contribuciones de los químicos García Fernández y Proust por la importancia del análisis químico en la época, el papel del mineralogista Christiano Herrgen es sin duda el más relevante para la historia de la Cristalografía. Afortunadamente tenemos hoy un estudio histórico de la figura de Herrgen (PARRA & PELAYO, 1996) donde el lector puede encontrar datos biográficos.

fue un “*mero accidente en la vida científica florentina*” (algo difícil de sostener) y que tanto Hooke como Huyghens fueron borrados por la influencia perversa de Isaac Newton. Aunque ciertamente la mano de Newton sobre todo lo que se opusiera a sus teorías también aquí pudo ser eficaz, no creo que tal sea la única explicación. BURKE (1966) sugiere que el principal problema era la falta de un instrumento para medir (que en el caso de las observaciones microscópicas era cierto) y en la dificultad de hacer creer a los científicos que ángulos tan poco redondos (por ejemplo  $108^{\circ} 15'$  en el yeso) tan alejados de los ángulos entre las caras de los sólidos platónicos pudieran tener algún significado y esconder alguna propiedad de carácter fundamental. Yo creo que la explicación de esos casi trescientos años de desinterés por la morfología se debe a razones más prosaicas. Hay que aceptar que pese al enorme esfuerzo y talento de los precrystalógrafos, ni las medidas de ángulos de los cristales, ni las investigaciones sobre la morfología de los mismos, ni los estudios de cristalización (necesariamente circunscritos a cristalización a partir de disoluciones como el caso de la sal gema, del alumbre o del vitriolo y algo más adelante a la cristalización de líquidos orgánicos), nada de eso proporcionaba información de utilidad. En un contexto, en el que la investigación minero-mineralógica y geológica era de crucial interés económico cuando no estratégico, ¿cómo podrían los estudios morfológicos competir con la enorme información que la corriente clásica werneriana (incluyendo la yatroquímica) proporcionaba a los metalurgistas y a los mineros? Así los estudios cristalográficos eran pura investigación fundamental, para algunos un divertimento, que ni siquiera ayudaba a clasificar las maravillosas colecciones –como la de Franco Dávila (AMORÓS,

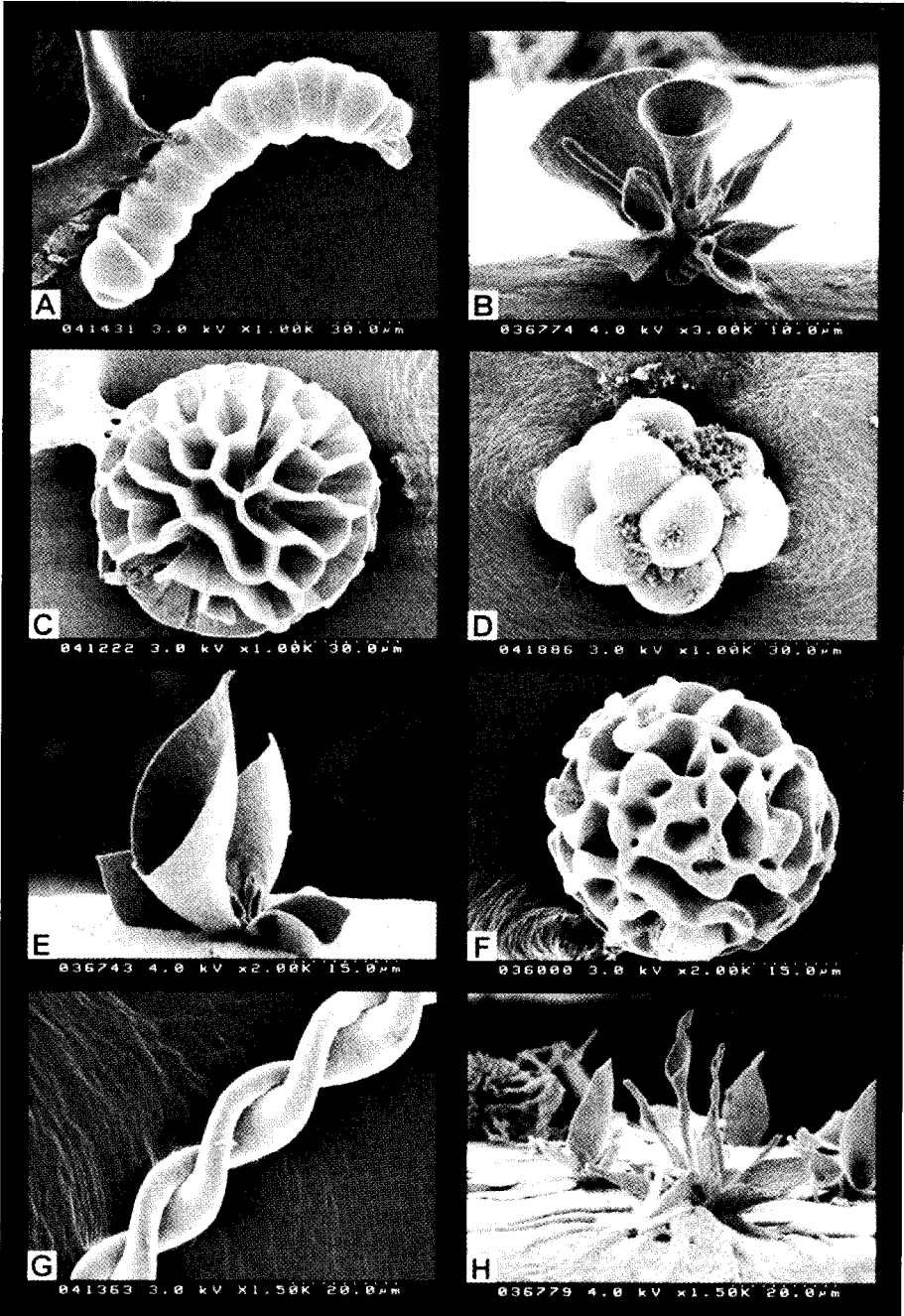
1963)– que asombraban a las cortes europeas y eran la semilla de los Gabinetes de Historia Natural. En ese afán clasificador del XVIII reinaba absolutamente Linneo (1707-1778) quien había revelado la existencia de un orden natural –que se creía universal– que permitía sistematizar con éxito la Botánica y la Zoología. Aunque se realizaron diversos y reiterados intentos (por ejemplo de Walerio o Gerhard, véase QUADRA, 1803) su sistema binomial había fallado en clasificar el reino mineral atendiendo a las propiedades de los caracteres exteriores wernerianos. No era de extrañar que Linneo viera con buenos ojos la alternativa morfológica presentada por de L’Isle de tal forma que en las ediciones posteriores de su ingente obra –continuamente revisada– *Sistema Naturae*, incluye figuras impresas y de modelos de madera siguiendo las ideas introducidas por la cristalografía francesa (LINNAEUS, 1768). Pues bien, a pesar de su enorme influencia, Linneo tuvo que soportar fuertes críticas cuando pretendió usar la morfología cristalina como posible herramienta de clasificación en las descripciones de especies minerales. La morfología era irrelevante si se comparaba con las propiedades físicas de los minerales, con el conocimiento de campo, propiedades que junto a la información química (cualitativa pero cada vez menos rudimentaria) habían llevado a cerebros como el de Werner a establecer un esquema de clasificación útil para la época.

Es precisamente enfrascado en la clasificación de aquellas colecciones de minerales cuando un siglo después de Steno, Romé de l’Isle (1736-1790) vuelve a realizar medidas (más bien a que se las hagan: véase BURCHARD, 1998) sobre una gran variedad de minerales y sales artificiales y se da cuenta que, independientemente del lugar de proce-

---

Fig. 1.–El proceso morfogénico por el que se ensamblan los millones de nanocristales de witherita que forman estas asombrosas estructuras con morfologías hiperbólicas con curvatura tanto positiva como negativa aún no se comprende en la actualidad. De la misma forma, las leyes que rigen la formación de estructuras similares –tanto en forma y textura– de los exoesqueletos y endoesqueletos de organismos vivos tampoco se conocen ni en detalle ni en extenso. En lo que se refiere a morfogénesis, una vez explicado en el siglo XIX y XX la de los monocristales– el futuro de la cristalografía aplicada a la Historia Natural mira hacia los agregados cristalinos, ya sean estructurados jerárquicamente o no, y al estudio de sus texturas. Fotos de GARCÍA-RUIZ *et al.* (2002).

–The morphogenetic mechanism by which millions of nanocrystals of witherite self-assemble to form these amazing structures with hyperbolic morphologies of either positive or negative curvature is still unknown. Likewise, the laws governing the formation of morphologically and texturally similar structures, as those found in the biominerals forming the endo- and exoskeletons of living organisms have not been either uncovered. Regarding morphogenesis, once the morphological behaviour of single crystals was explained during the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries, the future studies of crystallography in Natural History will focus on the morphology and textures of crystal aggregates –either hierarchically structured or not–. Pictures from GARCÍA-RUIZ *et al.* (2002).



dencia, de su hábito y de su origen, los ángulos entre caras son siempre idénticos y que la relación de formas poliédricas es siempre la misma para una misma especie (ROMÉ DE L'ISLE, 1763). Esta generalización, sustentada por infinidad de medidas realizadas con un aparato diseñado *ad-hoc* (el goniómetro de contacto) en cristales de minerales de diversas colecciones de minerales le lleva a establecer la primera ley de la cristalografía, la “ley de constancia de los ángulos diedros”, que definitivamente se instala como un hecho observacional irrefutable (ROMÉ DE L'ISLE, 1783). Ahora sí, ahora la forma cristalina era una propiedad específica de las especies minerales y por lo tanto era un criterio de clasificación. Para que la Cristalografía pudiera ofrecerse como el cuerpo teórico de la mineralogía sólo faltaba una gran mente que aunara toda la precisa información morfológica accesible mediante los goniómetros de contacto con la hipótesis ya centenaria del empaquetamiento de unidades elementales. Ese fue el papel de Haüy (1743-1822) quien desarrolló la teoría de las moléculas integrantes y la teoría reticular del cristal (HAÜY, 1818, 1822).

España era el lugar menos adecuado para que la nueva cristalografía francesa pudiera penetrar fácilmente. Todos los alumnos de la gran Escuela de Minas que Elhuyar soñó y con gran empeño y lucidez creó, pasaron becados por la Escuela de Freiburg. Así, Andrés del Río publica su *Origtognosia* y Juan Jose de Elhuyar su *Orygthologia* en América (AMORÓS, 1985; PUCHE RIART, 1993). En 1797, cuando Romé de L'Isle había publicado su obra y Haüy había dado a conocer sus descubrimientos y estaba escribiendo su *Tratado de Mineralogía* (HAÜY, 1801), Herrgen traduce la *Oritognosia* de Widenmann (1797), a la que considera la obra más moderna del fin de siglo. A pesar de ello, la categoría ética y científica de esa escuela tan inteligentemente formada por los Elhuyar se deja ver en los propios *Anales de Historia Natural* y en los *Anales de Ciencias Naturales*. Así, en el discurso de apertura de sus lecciones mineralógicas, leído el uno de febrero de 1802, Herrgen, convencido werneriano, dice (HERRGEN, 1802: 8): “*nadie ignora el mérito y trabajo inmenso de la cristalografía de Romé de l'Isle, el primero que fijó su atención en las formas geométricas que hallamos en el reyno mineral. Este naturalis-*

*ta abrió en cierto modo el camino que Haüy ha seguido con celebridad. A las investigaciones importantes de ambos debemos una observación muy ingeniosa, y es que la línea curva resulta en el reyno animal la mayor belleza de que son susceptibles sus formas, mientras que al contrario la línea recta ofrece el último término de perfección de que es capaz el reyno mineral*”; y hablando de Haüy, dice (HERRGEN, 1802: 9): “*Este célebre naturalista nos demuestra que los pequeños sólidos, elementos de los cristales, y que él llama moléculas integrantes, tienen una forma invariable en todos los individuos de una misma especie de mineral, y que los planos de esta forma se hallan en el sentido de la unión natural indicada por la división mecánica de los cristales, cuyos ángulos y dimensiones respectivas nos da el cálculo, y se hallan confirmadas por la observación*”. Recomiendo al lector, particularmente a los estudiantes, la lectura del artículo completo de Herrgen. Disfrutará con él como yo lo he hecho. Y también, como contrapeso para entender las diferentes formas de ver las controversias, conviene leer a su discípulo Ramón de la Quadra para comprobar como en los debates científicos se puede perder la elegancia (QUADRA, 1803: 5): “*Dos especies de contrarios tiene el sistema del mineralogista de Freyberg: la 1<sup>a</sup>. Es la de aquellos que no saben alguno; y la 2<sup>a</sup>. que es la peor, la de los que habiendo pretendido estudiarlo no han sido capaces de comprenderlo*”. Ambos artículos, son tan profundos y escritos con tanto conocimiento de causa, que leídos sosegadamente ayudan a comprender las raíces y la naturaleza de esa bella controversia sobre la clasificación de los minerales.

Así pues, tras casi trescientos años de avatares, el estudio preciso de los ángulos entre caras de los cristales proporcionó a la Historia Natural la explicación de la morfología de los cristales basada en el empaquetamiento de unidades elementales idénticas, de su crecimiento por acreción de capas de esas unidades, de la existencia de una correspondencia entre la forma y la especie mineral y por ende un criterio de clasificación natural. Todo fue más fácil a partir de entonces y durante el siglo XIX se produjo un continuo desarrollo de la teoría reticular desde la simetría y la geometría analítica hasta sus aplicaciones que explican las propiedades de los cristales (especialmente las ópticas) y su

formación, incluyendo el enantiomorfismo, el polimorfismo y el isomorfismo<sup>3</sup>. A esa gran obra de edificar el cuerpo teórico de la ciencia de los cristales no contribuyó la Cristalografía española.

Aunque las ideas de Haüy tardaran en impregnar la ciencia española, finalmente sedujeron a nuestros mineralogistas. Según AMORÓS (1963), la primera introducción de la corriente francesa en España se debe a la obra del director de la Escuela de Minas de Madrid, Felipe Naranjo y Garza publicada en 1862 (NARANJO, 1862) y a ella le sigue la obra de Madariaga (AMORÓS, 1963: 330) en la Escuela de Ingeniería de Montes. Esta afirmación es arriesgada porque como hemos visto ya se tenían conocimientos profundos de las ideas de Haüy a principios del XIX. En 1848 aparecen los *Elementos de Cristalografía* del profesor de Freiburg, Johan Müller, traducidos del francés por Aldana (MÜLLER, 1848) y en 1850, Verdú traduce la *Química y Principios de Cristalografía* de Victor Regnault. Se tiene constancia de que la famosa colección de sólidos cristalográficos realizados en arcilla que Haüy regaló al matemático gallego José Rodríguez y González fue usada por González de Linares y por Laureano Calderón, (AMORÓS, 1963; BARRERA, 2001). No obstante, y debido quizás a razones de índole política, la vinculación académica con Alemania no se ve especialmente mermada por una influencia intelectual francesa y no encuentro razones en contra para afirmar que la introducción de la teoría reticular viene de hecho de la mano de la cristalografía alemana conversa. Hay que tener en cuenta que las ideas de Haüy entran rápido en Alemania de la mano de Christian Weiss, quien, desde el propio Freiburg, traduce el *Traité de Mineralogie* de Haüy tan pronto como en 1804, es decir, tres años después de su aparición en París (AMORÓS, 1977).

Pocas contribuciones influyentes de cristalografía pudieron hacerse durante el XIX. El cristalógrafo zaragozano Pedro Ferrando Mas, tan preocupado siempre por la enseñanza de la Geología, —siguiendo a van T'hoff— propone la creación de una asignatura en la Universidad de Zaragoza para explicar la Cristalogenia litológica y la litogénesis. Donde mas brilló la cristalografía española fue

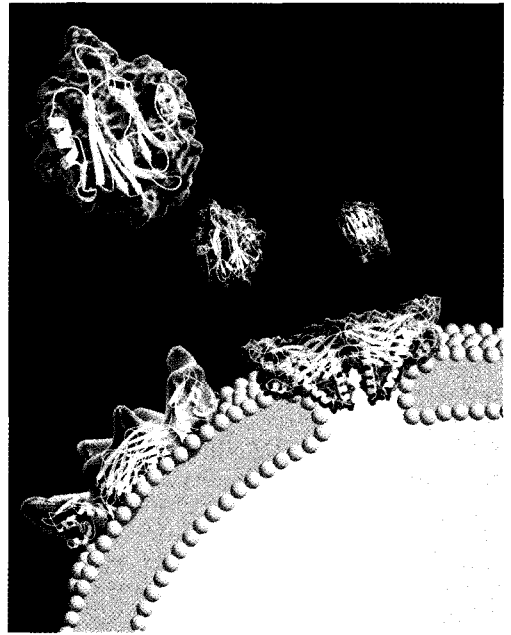


Fig. 2.—Mientras que en el siglo XX, la cristalografía estructural y la cristalografía química revolucionaron la mineralogía permitiendo la descripción y clasificación de los minerales y la comprensión de sus propiedades a nivel molecular, la cristalografía en el siglo XXI se enfocará hacia la comprensión de la biología de los sistemas moleculares, es decir a resolver las estructuras de las macromoléculas y de sus complejos que nos permitan entender los mecanismos de la vida a nivel molecular. La figura muestra la estructura tridimensional tanto en disolución como en presencia de una monocapa lipídica, de la toxina formadora de poros Sticholysin II producida por la anémona de mar *Stichodactyla helianthus*. Foto de MANCHENO *et al.* (2003).

—During the 20<sup>th</sup> century, structural crystallography and crystal chemistry changed the fundamentals of mineralogy allowing the description and classification of the minerals and the understanding of their properties on the basis of their molecular structures. The crystallography of the 21<sup>st</sup> century will rather focus on the understanding of the molecular systems biology, i. e. to solve the three-dimensional structures of the macromolecules and their complexes to explain life's mechanisms at molecular level. The picture shows the three-dimensional structure (monomers in solution but forming tetramers in the presence of a lipidic interface) of the pore-forming protein Sticholysin II produced by the sea anemone *Stichodactyla helianthus*. Picture from MANCHENO *et al.* (2003).

<sup>3</sup> Para un repaso a esa historia véase BURKE (1966) y AMORÓS (1978).

en el campo de la óptica cristalina, en la que hay que destacar sobre todo la figura de José Macpherson cuyas publicaciones en nuestros *Anales* son paradigmáticas para la mineralogía y la petrología española (para una biografía completa, véase BARRERA, 2002), a Quiroga (QUIROGA, 1875) y a Rafael Breñosa, quien publica en 1897 un excelente tratado sobre este tema (BREÑOSA, 1897). En cualquier caso, la literatura científica publicada en los *Anales* y en el *Boletín*, así como las obras de Cristalografía y Mineralogía traducidas demuestran que en la segunda mitad del siglo XIX, los cristalógrafos españoles beben otra vez, o mejor dicho, siguen bebiendo de la ciencia alemana. Por ejemplo, el propio Quiroga, primer catedrático de Cristalografía en España (BARRERA, 2001; PEREJÓN Y GOMIS, 2005), traduce la obra de Gustav Tschermak (1836-1927), socio Honorario de la SEHN y fundador de los *Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, cuyos trabajos sobre la sílice y los silicatos fueron ejemplares (CALDERÓN, 1894).

Laureano Calderón fue ayudante de Paul von Groth (1843-1927) mientras que su hermano Salvador Calderón<sup>4</sup>, Francisco Quiroga y –ya en el siglo XX– Gabriel Martín Cardoso, fueron sus discípulos. Ellos compartieron aulas con los discípulos del genial autor de las *Tabellarischen Übersicht der Mineralien* (cuya edición de 1921 fue traducida por Juan Carandell para la Junta de Ampliación de Estudios<sup>5</sup>), de los *Elemente der Physikalischen und Chemischen Kristallographie* y fundador de la aún prestigiosa revista *Zeitschrift für Kristallographie*. Eso quería decir, ni más ni menos, que nuestros cristalógrafos del final del XIX compartían aulas, laboratorios y cervezas con –por ejemplo– Paul Niggli, Max von Laüe y Paul Ewald, alumnos también de Groth. Pero además debieron encontrarse con colegas de Groth en Munich, por ejemplo con Roentgen o Sommerfeld (EWALD, 1962: 31-47). La conexión alemana de Francisco Pardillo, el primer catedrático de Cristalografía en Barcelona, y su discípulo Soriano Garcés, es también clara, especialmente con la escuela de Munich, esta vez a través de bibliografía y probablemente aprehendida durante la rea-

lización de su tesis doctoral en Madrid, puesto que no tenemos constancia de que Pardillo hubiera estado en Alemania ni antes ni después de obtener su cátedra a la edad de 28 años. Como veremos a continuación, no será de extrañar que la siguiente revolución cristalográfica –esta vez sí, realizada en Alemania– no le cogiera a nuestra ciencia con el pie cambiado.

### 3. LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X Y LA CRISTALOGRAFÍA ESTRUCTURAL

Todo el fascinante cuerpo teórico desarrollado durante el siglo XIX sobre la base de la hipótesis reticular, es decir del ordenamiento de la materia según un espacio periódico tridimensional, estaba sustentado sobre pruebas indirectas, aunque no circunstanciales. El experimento crucial, que no sólo demostró rotunda y directamente que los cristales estaban formados por agrupaciones de moléculas periódicamente distribuidas, sino que también demostró la naturaleza ondulatoria de los rayos descubiertos varios años antes por Roentgen, fue el realizado por Friedrich y Knipping, bajo sugerencia de Max von Laüe (FRIEDRICH, KNIPPING & LAÜE, 1912; LAÜE, 1912). Tras infructuosos intentos, lograron obtener un diagrama de difracción sobre una película fotográfica expuesta a la luz que provenía de un cristal de esfalerita donde incidía un haz de rayos X. La importancia de este experimento y de la exquisita explicación de Laüe fue inmediatamente reconocida porque era algo que se esperaba y que se estaba buscando en varios laboratorios simultáneamente. Era –todo el mundo lo sabía– la puerta a la determinación de la estructura de la materia. Era el “microscopio” que hacía falta para “ver” la estructura íntima de las moléculas. Era el nacimiento de la Cristalografía estructural y por ende de la Cristalquímica y la Cristalo-física, las dos ramas que cambiaron la orientación de los estudios mineralógicos para siempre. Ni la morfología, ni las propiedades externas, ni siquiera la pura química eran ya suficientes para entender las propiedades de los minerales y las rocas.

<sup>4</sup> De hecho, la famosa obra de Salvador Calderón *Los minerales de España* sigue la sistemática de Groth.

<sup>5</sup> Véase, FERNÁNDEZ NAVARRO, 1928; CANDEL VILA, 1954.



Que los cristalógrafos españoles estaban a principios del siglo XX a la altura de las circunstancias y en continuo contacto con los acontecimientos científicos de Europa, lo prueba precisamente el eco inmediato de los experimentos dirigidos por Laüe. Un simple hecho demuestra la modernidad de la cristalografía española y el papel de difusión que para ella juega la Real Sociedad Española de Historia Natural. Tan solo un año después del descubrimiento de la difracción de rayos X por los cristales, Francisco Pardillo publicó en nuestro *Boletín* un artículo sobre este descubrimiento y sobre los trabajos pioneros de Bragg (PARDILLO, 1913). Es un artículo de cuatro páginas, donde no se puede decir más en menos líneas, explicando de forma certera y simple todo el significado y el alcance de los descubrimientos alemanes sobre la difracción. Lo curioso aquí es, además, que este es el primer artículo de Pardillo sobre rayos X y el único que firmará en toda su vida, como único autor, sobre este tema (AMORÓS, 1955, 1973).

Dos años más tarde, Blas Cabrera (CABRERA, 1915), por aquel entonces director del Instituto Nacional de Física y Química, escribió un artículo similar para la Real Sociedad Española de Física y Química. Era un excelente momento para subirse al tren de los grandes descubrimientos y avances que se esperaban en el mundo de la Cristalografía. Todo estaba a punto. Hay que hacer notar, porque es notable, que en 1912 se fabricaba en Piedrabuena (Ciudad Real) un aparato de rayos X portátil que se utilizó en toda España y en toda Europa con fines médicos (aunque con resultados controvertidos, como todos los equipos de su época sin protección eficaz). Pero lo importante es resaltar que esos equipos se fabricaban aquí, gracias al talento del ingeniero Mónico Sanchez, creador de una fascinante aventura empresarial que no hemos sabido valorar, ni por su relevancia tecnológica ni por su entrañable quijotismo, historia de la que lamento no poder ocuparme en este trabajo. Podíamos hacer cámaras y otros instrumentos cristalográficos, construir las fuentes de rayos X y nuestros cristalógrafos, formados como comentábamos más arriba en Alemania, estaban preparados para contribuir a la creación de la Cristalografía estructural. Por ejemplo,

Gabriel Martin Cardoso, formado en Alemania a partir de los años 20, realiza sucesivas estancias en Munich y luego en Leibnitz, donde bajo la dirección de Rinne y de su ayudante Hentschel, resuelve la estructura de la epsomita, un sulfato magnésico heptahidratado de carácter polar, obtenidos sintéticamente a partir de disoluciones. La estructura —que publica en 1926 en Alemania (MARTIN CARDOSO, 1926) y en 1930 en España (MARTIN CARDOSO, 1930)— la resuelve mediante el uso de laüegramas (CANDEL VILA, 1954; ORDOÑEZ, 1996). Ya en 1931, existe una interesantísima polémica sobre la interpretación de estructuras, como la que mantienen Palacios y Garrido sobre la de la argentita y la acantita (PALACIOS & SALVIA, 1931; GARRIDO, 1931). Los cristalógrafos españoles comienzan con buen criterio a estudiar con difracción de rayos X problemas típicos de la identificación mineralógica en España. En nuestro *Boletín*, se publican una serie de trabajos de gran rigor basados en datos de difracción de rayos X, la mayor parte dedicados a la dilucidación de putativos nuevos minerales descubiertos en España. Por ejemplo, Julio Garrido publicaba en 1931 un artículo sobre la quiroquita, un nuevo tipo de galena propuesto por Fernández Navarro, utilizando la cámara de Debye-Scherrer, cámaras de Bragg y de Hilger. Martin Cardoso y Garrido publican otros sobre la teruelita y la glauberita. Son todos ellos trabajos de aplicación de técnicas cristalográficas ya al uso en Alemania, el Reino Unido o los Estados Unidos, sin ninguna contribución notable de carácter fundamental.

Aunque la labor de Blas Cabrera y Julio Palacios en el Instituto de Física y Química fue extraordinaria, tanto desde la gestión como desde la Ciencia, así como la de Pardillo en la Universidad de Barcelona fundamentalmente desde la gestión, quien comenzaba a apuntar como singular cristalógrafo estructural en esos años era Julio Garrido Mareca, un profundo conocedor de la cristalografía morfológica, que aprendió con Eduardo Hernández-Pacheco y Lucas Fernández Navarro y que gracias a las enseñanzas de Cabrera y, sobre todo, Martín Cardoso se convierte en un cristalógrafo de rayos X de primera clase<sup>6</sup>. Pero la guerra civil truncó

<sup>6</sup> Para una biografía de Garrido véase WYART (1983) y ORDOÑEZ & BARRERA, 2000.

toda esa fuerza con que la Cristalografía española se asomaba al mundo, aunque sea en el exilio voluntario cuando Garrido, que abandona la secretaría del Instituto Nacional de Física y Química en 1940, publica su primer libro (GARRIDO & ORLAND, 1946) de título similar al de Rinne, (RINNE, 1923) y el que para mí es su trabajo más profundo y original, *Materia y forma en los cristales y los seres vivos* (GARRIDO, 1942).

Además de consumado estructuralista, donde Garrido brilla es en el tratamiento de la morfología, no solo la cristalina que maneja con total seguridad (como también muchos otros colegas contemporáneos, como Ferrando, Breñosa, Pardillo o su propio maestro Fernández Navarro), sino en plantearse la relación estructura y forma y en atreverse —y ahí es donde reside la originalidad de su contribución— con el problema general de las formas de la naturaleza más allá de los monocristales minerales. Junto con otros pocos colegas del momento —como D'Arcy Thomson— Garrido se atreve a retomar el problema de la organización de los agregados cristalinos, bien sean inorgánicos u orgánicos, de origen mineral o de origen biológico, es decir, el gran problema que dejó abierto la cristalografía morfológica del XIX y que aún hoy en día está por cerrar. Tan pronto como en 1932, ya había apuntado su interés en una pequeña nota estudio publicada en nuestro *Boletín* (GARRIDO 1932) sobre los caparzones de carbonato cálcico de equinoideos, y éste será su caballo de batalla durante toda su carrera profesional como se muestra en su excelente obra sobre forma y estructura de los cristales publicada cuarenta años más tarde (GARRIDO, 1973).

Como hemos indicado, desde 1936, el exilio y las dificultades sociales y económicas hicieron de España el lugar menos apropiado para que la Ciencia se desarrollase. Sin embargo, es sorprendente que tras finalizar la segunda guerra mundial, la Cristalografía española se recupera y toma fuerza antes de que termine la década de los cuarenta. En 1947 se creó la Internacional Union of Crystallography (IUCr) y dos años más tarde, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas nombra el Comité Nacional Español de Cristalografía, que se adhiere a la Unión Internacional. La Cristalografía es así una de las primeras ciencias que se organizan a nivel internacional, y en 1948 aparece la revista

internacional auspiciada por la IUCr *Acta Crystallographica*. En su primer número sobresale Julio Garrido, con dos artículos (uno de ellos el que abre volumen) sobre observaciones de la difusión de los rayos X por los cristales de clorato sódico y una nota sobre la cristalografía de la cantaridita. En él también aparece la reseña escrita por Wyart de su libro publicado en 1946 cofirmado con Orland. No se entiende, al menos yo aún no he entendido, porqué se le impidió a un cristalógrafo de esa talla realizar su carrera en España. Algún día se sabrá.

Dos años más tarde, en 1950, se crea la Asociación Cristalográfica Española (ACE) que consta de unos 35 miembros (EWALD, 1962: 498) incluyendo “*a cristalógrafos puros y también a químicos, físicos, ingenieros y otros especialistas que usan métodos de difracción de rayos X o de electrones*” (AMORÓS & LONSDALE, 1950). La primera reunión de la ACE tuvo lugar en Barcelona durante los días 5 a 8 de julio de 1950, nombrándose la primera Junta de Gobierno presidida por el Prof. Francisco Pardillo, al que acompañaban el Dr. L. Rivoir (director del Instituto de Física Alonso de Santa Cruz, anteriormente Instituto Nacional de Física y Química) como Vicepresidente, el Prof. G. Martin Cardoso como tesorero, M. Abbad como secretario y J. L. Amorós como vocal ordinario. Asistió a esa reunión, invitada por el CSIC y la ACE, la Dra. Kathleen Lonsdale del University College de Londres (lo que muestra un relevante cambio en las relaciones internacionales), que impartió dos conferencias sobre difracción de neutrones y sobre agitación térmica en cristales, que posteriormente fueron publicadas en la *Revista de la Real Sociedad Española de Física y Química* (LONSDALE, 1952). Otra conferencia fue impartida por el Dr. L. Rivoir sobre el Instituto Alonso de Santa Cruz de Madrid. La relación con la industria era escasa o nula en la mayoría de los grupos de investigación. Es notorio que el Dr. Julio Garrido estuvo en esta primera reunión de la ACE, en la que disertó sobre los métodos de diferencias, una nueva forma de interpretar los mapas de Patterson.

A finales de los años 40, la cristalografía española disponía ya de algún equipamiento propio, como las cámaras de rayos X de movimiento de película diseñada por Amorós para los métodos de Jong-Bowan y de Weissenberg, que fueron construidas en el

Instituto de Física Aplicada Torres Quevedo de Madrid. Además de una máquina de cálculos comerciales se disponía también de las reglas de cálculo para factores de estructura diseñada por M. Font-Altaba y por Abad, quien junto con Gomis presentaron una *comunicación sobre la estructura del BaS<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 2H<sub>2</sub>O*, en especial sobre el uso de las pseudo-extinciones para las coordenadas de los átomos pesados, mientras que Font Altaba describió sus estudios sobre la determinación estructural de la sacarina y sus sales metálicas. Amorós presentó la estructura del hidrocloreto del ácido L-glutámico resuelta con métodos de ensayo y error enteramente basado en síntesis de Fourier y junto con Pardillo, un estudio sistemático mediante difracción de rayos X de los asbestos y crisotilo de más de 100 localidades distintas, artículo que fue publicado ese mismo año (PARDILLO & AMORÓS, 1950) y que sería la última contribución científica de Pardillo, quien murió cinco años más tarde, en 1955. Como vemos, brillaba ya en esa primera reunión el joven Amorós que iba a ser el cristalógrafo español más notable de la segunda mitad del siglo XX y el gran animador de la Cristalografía en el *Boletín de la RSEHN*, en la que publica entre 1950 hasta su fallecimiento, cincuenta y dos artículos. Muchos de esos artículos son sobresalientes –en el sentido estricto de la palabra– y algunos son aun citados en las revistas internacionales de hoy día, incluyendo sus notas historiográficas de gran valor, que fueron la semilla de su excelente repaso a la aventura de la Cristalografía (AMORÓS, 1978)<sup>7</sup>.

A pesar de ello, hay que admitir que la Cristalografía deja de tener una presencia importante en los últimos cincuenta años de nuestro *Boletín*, razón por la cual doy por terminado mi análisis en este trabajo –que recordemos, está enfocado en la RSEHN– con la fundación de la ACE en 1950. Esa carencia de publicaciones relevantes de Cristalografía en nuestro *Boletín* se debe fundamentalmente a dos motivos. El primero, a la falta de peso relativo que los problemas de la Mineralogía y la Geología empiezan a tener en el desarrollo de la Cristalografía, más

interesada en ese momento en desvelar fundamentos de las propiedades físicas y químicas de los cristales y en sus aplicaciones a la naciente Ciencia de los Materiales. Nótese que muchos de los trabajos publicados por Amorós, Font-Altaba y otros<sup>8</sup>, no tratan con minerales sino con compuestos sintéticos, en muchos casos orgánicos. El segundo a la internacionalización de la Cristalografía por una parte, como ciencia de fuerte crecimiento, competitiva y de vital importancia para varios campos estratégicos de la investigación y la industria y por otra, a la salida de la ciencia española de la autarquía tras la caída de la dictadura franquista. Desde la recién creada Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva se lanzaban claras indicaciones de la necesidad de entrar en la arena internacional, lo que forzaba a la publicación de nuestros mejores trabajos en revistas de difusión e impacto. Obsérvese que esta internacionalización de la que la Cristalografía fue pionera, creaba una situación absolutamente nueva. Baste recordar que –como todos los grandes avances de la Cristalografía hasta los años cincuenta del siglo veinte– el experimento crucial de la difracción de rayos X por los cristales fue publicado en la *Revista de la Academia de Ciencias de Bavaria* y en la lengua vernácula de los autores. ¡Y se propagó como la pólvora!

No quiero terminar este trabajo sobre la Cristalografía española (que he cortado en 1950) sin apostar por un futuro con una mayor contribución de la Cristalografía en las publicaciones de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sospecho que la traducción automática pronto hará que podamos publicar en nuestra propia lengua y que a medida que la Ciencia española vaya ganando peso, será más relevante el contenido del estudio que el lugar donde se publique. Me atrevo a adelantar que existen dos temas en los que aún la cristalografía tiene mucho que decir a la Historia Natural. Uno de ellos, ya lo hemos comentado y es muy caro a nuestra historia, desde Fernández Navarro a Garrido Mareca, desde Palacios a Amorós y a quien esto escribe, que es el tema extraordinario e

<sup>7</sup> Nuestra sociedad le dedicó un número del *Boletín (Sección Geológica)* a la memoria del Profesor Amorós, en concreto el volumen 97 de 2002. Para una bibliografía completa de su obra de Amorós véase el artículo de LOPEZ ANDRÉS & LOPEZ-ACEVEDO en ese volumen.

<sup>8</sup> A excepción de la escuela granadina de Martín-Vivaldi, de orientación más mineralógica, pero cuya contribución a la cristalografía de las arcillas será notable.

irresoluto del orden de las formas autoensambladas en la Naturaleza, la morfogénesis incluyendo desde la autoorganización geoquímica y geomorfológica a los fabulosos edificios biominerales o las formas vivas carentes de esqueletos y al papel de los cristales en la transición entre la materia inerte y la vida<sup>9</sup>. Junto a ese fascinante tema, no hay duda que la Cristalografía seguirá teniendo una tremenda penetración en la Historia Natural a través de la Biología Estructural. Hoy por hoy, la Cristalografía es la mejor herramienta que tenemos para desvelar la estructuras de las grandes moléculas de la vida (desde las proteínas o los ácidos nucleicos a los grandes complejos macromoleculares) y la relación con la función que realizan en el organismo. Aunque hoy en día esos estudios apuntan, por razones obvias, a la biomedicina y a la creación de fármacos, pronto lo harán a los grandes problemas de la Historia Natural, es decir, descifrar los mecanismos moleculares que gobiernan la vida. Como habrás deducido, curioso lector, otra vez más de lo mismo: forma y estructura.

#### BIBLIOGRAFÍA

- AMORÓS, J. L. 1955. Don Francisco Pardiño Vaquer. *Publicaciones del Departamento de Cristalografía y Mineralogía*, **2**: 79-83.
- 1963. Cristalografía. In: *Enciclopedia de la cultura española*. pág. 564. Editora Nacional. Madrid
- 1963. Notas sobre la historia de la Mineralogía y Cristalografía. III. La colección del caballero Franco Dávila y el origen del Gabinete de Historia Natural. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, **61**: 9-37.
- 1973. Memorial of Francisco Pardiño. *American Mineralogist*, **58**: 383-384.
- 1974. Weiss y los orígenes de la cristalografía. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, **75**: 23-33.
- 1978. *La gran aventura del cristal: naturaleza y evolución de la ciencia de los cristales*. Editorial Universidad Complutense de Madrid. 327 págs. Madrid.
- 1985. Andrés del Río y su obra. In: *Elementos de Orictognostia*, edición facsímil. págs. 43-96. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- AMORÓS, J. L. & LONSDALE, K. 1950. Crystallography in Spain. *Nature*, **166**: 391-392.
- BARRERA, J. L. 2001. El institucionista Francisco Quiroga y Rodríguez (1853-1894), primer catedrático de Cristalografía de Europa. *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza. II época*, **41-42**: 99-116.
- 2002. Biografía de José Macpherson y Hernas (1839-1902). *Boletín de la Institución Libre de Enseñanza (Homenaje a José Macpherson)*, **45-46**: 47-78.
- BARTHOLINUS, E. 1669. *Experimenta Crystalli Islandici Disdiacastici*. Copenhagen.
- BIRINGUCCIO, V. 1540. *The Pirotechnia of Vanoccio Biringuccio* [Traducción de Cyril Stanley Smith and Martha Teach Gnudi, 1966]. MIT Press.
- BRAGG, W. H. & BRAGG, W. L. 1913. *The reflections of X-rays by crystals. Proceedings of the Royal Society of London*, **38**: 428-438.
- BREÑOSA TEJADA, R. 1897. *Introducción al estudio de la cristalografía óptica*. Madrid.
- BURCHARD, U. 1998. History of the development of the crystallographic goniometer. *Mineralogical Record*, Nov/Dec.
- BURKE, J. G. 1966. *Origins of the Science of Crystals*. Berkeley and Los Angeles.
- CABRERA, B. 1915. Estado actual de la teoría de los rayos X y Å y su aplicación al estudio de la estructura de la materia. *Anales de la Real Sociedad Española de Física y Química*, **13**: 7-63-129 y 189.
- CANDEL VILA, R. 1954. El profesor Gabriel Martín Cardoso (1896-1950). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, **52**, 5-19.
- CALDERÓN, S. 1894. El profesor D. Francisco Quiroga y Rodríguez. *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural*. Actas, **23**: 150-164.
- 1910. *Los minerales de España*. 2 vol. Publicaciones de la Junta de Ampliación de Estudios. Madrid.
- CAPELLER, M.A. 1723. *Produmus Crystallographiae de Crystallis improprie sic dictis commentarium*. Lucernae, [Traducción de K. Mieleitner, 1922]. Munich.
- EWALD, P. P. 1962. The world-wide spread of X-ray diffraction methods, in 50 Years of X-ray Diffraction. págs. 498-507. *International Union of Crystallography*. N.V. A. Oosthoek's Uitgeversmaatschappij. Utrecht
- FABIAN, E. 1986. *Die Entdeckung der Kristalle*. Leipzig.
- FERNÁNDEZ NAVARRO, L. 1928. Tschermak y Groth, dos grandes mineralogistas, cristalógrafos y petrógrafos, recientemente fallecidos. *Conferencias y Reseñas Científicas de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, **3**: 103-109.
- FERNÁNDEZ PÉREZ, J. 1993. Estudio Preliminar. In: *Anales de Historia-Natural 1799-1804*. págs. 15-130. [Edición facsímil]. Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología. Madrid.
- FRIEDRICH W., KNIPPING P. & LAUE, M. 1912. *Interferenz-Erscheinungen bei Röntgenstrahlen. Proceedings of the Bavarian Academy of Sciences*, 303-322.
- GARCÍA-RUIZ, J. M., CARNERUP, A., CHRISTY, A. G., WELHAM, N. J. & HYDE, S. T. 2002. Morphology: An ambiguous indicator of biogenicity. *Astrobiology*, **2**: 353-369.

<sup>9</sup> Recordemos que aquella tajante división que hacían Rome de L'Isle o Quadra entre la materia mineral y la materia viva u organizada, puede carecer hoy de fundamento.

- GARRIDO, J. 1931. Estructura cristalina de la argentita y la Acanthita. *Anales de la Sociedad Española de Física y Química*, **29**: 505-513.
- 1932. Notas y comunicaciones: sobre la estructura y textura del carbonato cálcico en Cancer Pagurus y en Echinocardium mediterraneum. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, **32**: 377.
- 1942. Materia y forma en los cristales y los seres vivos. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, **40**: 533-565.
- 1973. *Forma y estructura de los cristales*. 227 págs. Editorial Alambra, Madrid.
- GARRIDO, J. & ORLAND, J. 1946. *Los rayos X y la estructura íntima de los Cristales. Fundamentos teóricos y métodos prácticos*. 260 págs Editorial Dosat. Madrid.
- HAÛY, R. J. 1801. *Traite de Mineralogie*. Paris, 5 Vols. [Edición facsímil, 1968] Bruxelles, Culture et Civilisation.
- 1818. Observations sur la mesure des angles des cristaux. *Annales des Mines*, **3**: 411-442.
- 1822. *Traite de Cristallographie*. 2nd edición. Paris.
- HERRGEN, C. 1802. Discurso leído por D. Christiano Herrgen, profesor de mineralogía. *Anales de Ciencias Naturales*, **13**: 3-19
- HUYGHENS, C. 1690. *Traite de la Lumiere*. Leiden, [Traducción de E. Lommel, 1964]. Abhandlung vom Licht. Darmstadt.
- LAUE, M. 1912. Eine quantitative Prüfung der Theorie für die Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen. *Proceedings of the Bavarian Academy of Sciences*, 363-373.
- LINNAEUS, C. 1768. *Sistema Natura, Homiae*. 3 vol.
- LONSDALE, K. 1952. Movimientos térmicos de los átomos en los cristales [Conferencia dada en la 1ª Reunión de la Asociación Española de Cristalografía, el 6 de julio de 1950, traducida por J.L. Amorós]. *Anales de la Real Sociedad Española de Física y Química. Sección A. Física*, **48**: 47-53, 12 figs.
- LÓPEZ ANDRÉS, S. & LÓPEZ-ACEVEDO, M. V. 2002. Recordando al Profesor D. José Luis Amorós Portolés, 1920-2001. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, **97** (1-4): 139-158.
- MANCHEÑO, J. M., MARTÍN-BENITO, J., MARTÍNEZ-RIPOLL, M., GAVILANES, J. G. & HERMOSO, J. A. 2003. Crystal and electron microscopy structures of Sticholysin II actinoporin reveal insights into the mechanism of membrane pore-formation. *Structure*, **11**: 1319-1328.
- MARTIN CARDOSO, G. 1926. Feinbauliche Untersuchung am Epsomit. *Zeitschrift für Kristallographie*, **63**: 19-33.
- 1930. Los modernos métodos roentgenográficos aplicados a la determinación de la estructura cristalina de la epsomita. *Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales, serie geológica*, **37**: 1-85.
- MÜLLER, J. 1848. *Elementos de Cristalografía*. Traducidos del francés con las notas de Jerónimo Mícklés por Lucas de Aldana. Librería de Delmas é hijo, Bilbao.
- MUÑOZ DE MADARIAGA, J. 1896. *Lecciones de Mineralogía*. Escuela de Ingenieros de Montes. Madrid.
- NARANJO Y GARZA, F. 1862. *Elementos de Mineralogía General*. Madrid.
- ORDOÑEZ, S. 1996. Gabriel Martín Cardoso (1896-1954): el nacimiento en España de la determinación de estructuras cristalinas mediante los Rayos X. La Escuela Geológica de Madrid. *Actas 3er Congreso Geológico de España (Simposios)*, **2**: 566-578.
- ORDOÑEZ, S. & BARRERA, J. L. 2000. Julio Garrido Mareca (1911-1982). La carrera truncada de un cristalógrafo o un fracaso académico de la Universidad Española. *Geotemas*, **1**(3): 67-72.
- PALACIOS, J. & SALVIA, R. 1931. Estructura cristalina de la argentita y la Acanthita. *Anales de la Real Sociedad Española de Física y Química*, **29**: 260-279 y 514-515.
- PARDILLO, F. 1913. Descubrimientos recientes sobre la estructura de los cristales. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, **13**: 336-339.
- PARDILLO F. & AMORÓS J. L. 1950. Particularidades de la estructura del crisotilo. *Anales de la Real Sociedad Española de Física y Química*, **48**: 37-44.
- PARRA, D. & PELAYO, F. 1996. Christian Herrgen y la institucionalización de la mineralogía en Madrid. *Asclepio*, **XLVIII** (1): 163-181.
- PEREJÓN, A. & GOMIS, A. 2005. La Geología y sus protagonistas en España desde 1900 Hasta 1970. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, **100**: 235-276.
- PUCHE RIART, O. 1993. *La Orythologia* de Juan José Delhuyar y la *Oricotognosia* de Andrés Manuel del Río, primeros tratados geológicos escritos por españoles en América. *Boletín Geológico y Minero*, **104**: 72-108.
- QUADRA, DE LA R. 1803. Introducción a las tablas comparativas de las substancias metálicas. *Anales de Ciencias Naturales*, **16**: 1-17.
- QUIROGA, F. 1875. El microscopio en litología. *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural*, **4**: 409-420
- RINNE, F. 1923. *Introducción al estudio de los cristales y la estructura íntima de la materia*. [Traducida del alemán por el Dr. Francisco Pardillo. 161 págs.] Imprenta Elzeviriana. Barcelona.
- ROME DE L'ISLE, J. B. L. 1763. *Catalogue systematique et raisonné des curiosités de la nature et de l'art, qui composent le cabinet*. Tomo I, 577 págs. Ed. Birasson. Paris.
- 1783. *Cristallographie ou Description des Formes Propres a tous les Corps du Regne Mineral, dans L'Etat de Combinaison Saline, Pierreuse or Metallique*. Segunda edición, 4 Volúmenes, De L'Imprimerie de Monsieur. Paris.
- ROSE, G. 1834. *Eléments de cristallographie*. [Traducción del alemán de Victor Regnault, 270 págs]. F. Didot-Frères, Paris.
- STENONIS, N. 1669. *De Solido Intra Solidvm Natvraliter Contento Dissertationis Prodromvs*. [Florencia. Existe una versión electrónica de la edición de 1669 en la web de Cultural Heritage Language Technologies (<http://www.chlt.org/sandbox/lhl/steno1669/index.html>). También existe al menos un ejemplar disponible de esa edición al precio de 95.000 dólares].
- WIDENMANN, J. F. W. 1797. *La Oricotognosia* [Escrita en alemán por D. Juan Federico Guillermo Widenmann y traducida por Don Christiano Herrgen. Madrid. Imprenta Plácido Barco López].
- WYART, J. 1983. Julio Garrido (1911-1982). *Bulletin de Minéralogie*, **106**: 263.