

Los mapas de recursos minerales de la Península Ibérica: unos mapas con mucho interés

Os mapas de recursos minerais da Península Ibérica: uns mapas com muito interesse

The Iberian maps of Mineral Resources: a very interesting kind of maps

Ester Boixereu¹ & Daniel de Oliveira²

*1. Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas, 23,
28003 Madrid, España*

*2. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P. Estrada da Portela,
2610-999 Amadora, Portugal*

PALABRAS CLAVE: Cartografía, Recursos minerales, Península Ibérica

PALAVRAS CHAVE: Cartografia, Recursos minerais, Península Ibérica

KEY WORDS: Cartography, Mineral resources, Iberian Peninsula

RESUMEN

La cartografía de recursos minerales incluye distintos grandes tipos de mapas: por una parte, los mapas mineros en los que se representan las principales características de los yacimientos e indicios minerales de interés económico, y por otra parte, los mapas metalogenéticos, en los que se muestran la distribución de las concentraciones de los minerales, de interés económico en relación al marco geológico, de este modo se establecen los tipos genéticos y se definen los metalotectos.

Desde mediados del siglo XIX se han realizado distintas ediciones de mapas geológicos completos de la Península Ibérica. Sin embargo, los mapas de recursos minerales han sido siempre mapas de ámbito exclusivamente estatal y no hay cartografías de este tipo que abarquen ambos países; por lo tanto, en este trabajo se describen de forma separada las cartografías españolas y portuguesas.

En España, el primer mapa minero fue publicado en 1936 por el Instituto Geológico y Minero, a escala 1:2.500.000, aunque en la base geológica se representaba también a Portugal, los datos mineros se limitaban al territorio español. Posteriormente, entre 1969 y 1972, se realizó el Mapa Metalogenético de España a escala 1:200.000, que supuso un inventario completo de todos los indicios mineros españoles. En 1982 se inició un programa de revisión del Mapa Metalogenético de España a escala 1:200.000, que implicaba el inventario y reconocimiento de campo de todos los indicios mineros, la toma de muestras y los estudios mineralógicos.

El primer mapa minero de Portugal data del año 1960, se trata de un mapa a escala 1:500.000 de minerales metálicos, no metálicos y energéticos elaborado por las Circunscricões Mineiras y los Servicios Geológicos. En él, sobre una base geológica muy simple, se indica la superficie ocupada por las concesiones mineras. En 1992 los Servicios Geológicos y la Direcção Geral de Geologia e Minas editó un mapa de indicios mineros como anexo a la hoja 1 del Mapa Geológico de Portugal a escala 1:200.000. Entre los años 2000 y 2006 fueron publicadas por el Instituto Geológico e Mineiro una serie de mapas de indicios minerales de Portugal, en distintas hojas a escala 1:250.000. En la actualidad se está finalizando una

campanha de cartografía minera nueva y más detallada, que pretende cubrir Portugal con mapas a escala 1:200.000.

En el presente trabajo se analizan y comparan las distintas series cartográficas de recursos minerales que se han realizado en la Península Ibérica.

RESUMO

A cartografia de recursos minerais inclui vários dos principais tipos de mapas: por um lado, os mapas mineiros que representam as principais características dos depósitos minerais e características de interesse económico e, por outro lado, os mapas metalogenéticos, em que a distribuição das concentrações de ocorrências minerais de interesse económico, em relação à estrutura geológica, estabelece os tipos genéticos e define os seus metalotectos.

Desde meados do século XIX houve várias edições de mapas geológicos da Península Ibérica. No entanto, os mapas de recursos minerais têm sido mapas fornecidos exclusivamente a nível estatal e não existem mapas deste tipo cobrindo ambos os países; portanto, neste trabalho são descritas, separadamente, as edições de mapas Espanhóis e Portugueses.

Em Espanha, o primeiro mapa de recursos foi publicado em 1936, pelo Instituto Geológico y Minero, na escala 1:2.500.000, na base geológica do qual também é representado Portugal, embora os dados mineiros estejam limitados ao território espanhol. Mais tarde, entre 1969 e 1972, o Mapa Metalogenético de Espanha, na escala de 1:200.000, representou um inventário completo de todas as ocorrências minerais de Espanha. Em 1982 foi iniciado um programa de revisão do Mapa Metalogenético de Espanha mapa à escala 1:200.000, a qual envolveu o inventário e reconhecimento de campo de todas as ocorrências minerais, bem como a amostragem e estudos mineralógicos.

O primeiro mapa de recursos de Portugal data de 1960. É um mapa na escala 1:500.000, de materiais metálicos, não-metálicos e energéticos desenvolvido pelas Circunscrições Mineiras e Serviços Geológicos, em que, numa base geológica muito simples, é indicada a área ocupada pelas concessões mineiras de prospeção e pesquisa. Em 1992, a Direção Geral de Geologia e Minas publicou um mapa de indícios mineiros, anexos à folha 1 Mapa Geológico de Portugal à escala 1:200.000. Entre 2000 e 2006 foram publicados pelo Instituto Geológico e Mineiro uma série de mapas de ocorrências minerais, em folhas separadas, na escala 1:250.000. Presentemente está-se a finalizar uma nova campanha de cartas minerais 1:200.000 mais detalhada, que visa cobrir Portugal de Norte a Sul.

Neste trabalho analisamos e comparamos as séries cartográficas de recursos elaboradas na Península Ibérica.

ABSTRACT

The mapping of mineral resources includes several large types of maps: on the one hand, the mining maps in which the geographic location and the main characteristics of the mineral deposits and indications of economic interest are represented. On the other hand, metallographic maps, which show the distribution of mineral concentrations, are of economic interest in relation to the geological framework, thus establishing genetic types and defining metallotects.

Since the middle of the nineteenth century different editions of complete geological maps of the Iberian Peninsula have been made. However, maps of mineral resources have always been exclusively state-wide maps and there are no maps of this type covering both countries. Therefore, this work describes the Spanish and Portuguese mapping efforts separately.

In Spain, the first mining map was published in 1936 by the Geological and Mining Institute, at a scale of 1:2.500.000, although the geological base was also represented in Portugal but the mining data were limited to Spanish territory. Subsequently, between 1969 and 1972, within the National Mining Plan, the Spanish Metallogenic Map was carried out at a scale of 1:200.000 in different sheets, which was a complete inventory of all known Spanish mineral occurrences. On a simplified geological basis, mineral occurrences were projected (with symbols expressing morphology, size, ore, gangue, rock, and age) and the main metallotects were drawn. In 1982 a program of revision of the Spanish Metallogenic Map was started at a scale of 1:200.000, which involved the inventory and field reconnaissance of all mineral occurrences, sampling and mineralogical studies. The map included a memory and standardized index files were filled in and entered into the BDMIN database. For the

moment, the sheets of the most relevant metalogenic and also specific metalogenetic maps of some Autonomous Communities, such as Extremadura, Andalusia, Cantabria, Basque Country and Murcia have been mapped.

The first mining map of Portugal dates from the year 1960, at a scale of 1:500.000 of metallic, nonmetallic and energetic minerals elaborated by the *Circumscrições Mineiras* and the Geological Survey. On a very simple geological base are the areas occupied by the mining concessions. In 1992 the Geological Survey and the General Directorate of Geology and Mining published a map of mineral occurrences as an annex to sheet 1 of the Geological Map of Portugal at a scale of 1:200.000. Between 2000 and 2006 a series of maps of mineral occurrences of Portugal were published by the Geological and Mining Institute, in different Sheets at a scale of 1:250.000. A new and more detailed mineral resource campaign is currently being finalized, which aims to cover Portugal with 1:200.000 scale maps.

In the present work we analyze and compare the different maps series of mineral resources that have been carried out in the Iberian Peninsula.

1. INTRODUCCIÓN

Los yacimientos minerales son concentraciones naturales de metales, minerales o rocas útiles que pueden ser explotadas económicamente. Las concentraciones que son demasiado pequeñas o que tienen una ley demasiado baja para ser explotadas, se denominan “indicios”. Por lo tanto los yacimientos minerales pueden considerarse simplemente como rocas valiosas, y su génesis es análoga a la que ha originado a las rocas comunes y que se investigan con metodologías convencionales.

Desde antiguo, ha habido expertos en prospección minera que conocían guías para encontrar los yacimientos minerales que se exploraban. Éstas eran frecuentemente empíricas y se basaban en una gran experiencia en la observación de la naturaleza. Con el desarrollo de la Geología, los métodos se fueron racionalizando y estas observaciones empíricas dieron paso a la Metalogenia. Teniendo en cuenta que los mapas son una de las herramientas principales de la geología, y su principal vehículo de expresión, se debe considerar la cartografía metalogenética y la de recursos minerales en general como una cartografía que nos muestra los conocimientos sobre los yacimientos minerales de una determinada región, y por ellos siempre es un efectivo instrumento de exploración minera.

Este trabajo tiene como objetivo analizar los distintos tipos de cartografías de recursos minerales que se han realizado en la península Ibérica. En un primer lugar se expone brevemente una revisión histórica de los distintos tipos de representación espacial de los recursos minerales; después se describen los distintos tipos de cartografías de recursos minerales que existen, y, por último se analizan los distintos tipos de cartografías que se han realizado en la península, abordando de forma separada los dos países.

2. HISTORIA DE LOS MAPAS DE RECURSOS MINERALES

La representación cartográfica de los recursos minerales es muy antigua. No es un hecho casual que uno de los mapas más antiguos que se conservan, el *Papiro de Turín* (1.150 a.C.), sea un mapa minero. Este mapa muestra con precisión la distribución geográfica de los distintos tipos de roca en la que se incluye información sobre la situación de canteras de rocas ornamentales y de minas de oro del Wadi Hammamat en la región de Nubia (Egipto).

Sin embargo, no es hasta mucho más tarde, a principios del siglo XVIII, cuando la cartografía alcanza un gran desarrollo y precisión, permitiendo representar sobre

la base topográfica distintos elementos, como son los yacimientos minerales, que permitirán el desarrollo de los mapas temáticos. Uno de estos primeros mapas mineros es el Mapa del Arzobispado de Salzburgo de Homann (1716) en el que vienen representadas 30 minas y 62 indicios mineros de 11 sustancias distintas (BOIXEREU, 2016). Con posterioridad, el Comte Marsigli publicó el "*Mappa metallographica fodinas in Hungaria*" (1726), en el que sobre un fondo esquemático dibujó las minas y los yacimientos minerales de 14 sustancias distintas.

Por su parte, Francia contaba a mediados del siglo XVIII, con una cartografía topográfica a escala 1:86.000 muy precisa que permitió a Jean-Étienne Guettard (1715-1786), con el apoyo financiero de la Corona, acometer el ambicioso proyecto de realizar una cartografía mineralógica (litológica y de recursos mineros) detallada de toda Francia. En estos mapas se representaban como puntos discretos la distribución de los distintos tipos de materiales geológicos, las ubicaciones de los depósitos minerales y, ocasionalmente, los yacimientos de fósiles.

En la Europa Central, la industria y la exploración minera habían alcanzado un gran desarrollo. En la ciudad de Freiberg (Sajonia) se fundó, en 1766 la Academia de Minas, que iba a tener un papel determinante en el desarrollo de las ideas geológicas. El profesor más influyente de la Academia fue A.G. Werner (1749-1817) quien introdujo la importancia de la secuencia temporal de las rocas y la sistematización de los materiales geológicos, dividiéndolos en grandes unidades. Su método de trabajo, que daba importancia a la distribución geométrica de los materiales terrestres propició las representaciones cartográficas y varios alumnos dibujaron mapas geognóstico/litológicos. Entre ellos se encuentran el de Sajonia de W. Charpentier (1778), y de Baviera de M. Flurl (1792). Queremos aquí señalar el mapa geognóstico del Tirol que el español Carlos Gimbernat realizó en 1808 y que muestra la distribución de las principales minas.

Por lo tanto, es indudable que el desarrollo de la Geología, como ciencia está estrechamente vinculado a la minería, tal como sostiene Álvarez (2004). Las necesidades energéticas y de abastecimiento de materias primas minerales que exigía la industria durante la Revolución Industrial del siglo XVIII, impulsaron el desarrollo de un aparato teórico que permitiera predecir dónde encontrar nuevos yacimientos minerales y, principalmente, de carbón. Así, el nacimiento de la geología hay que buscarlo en el alto grado de perfeccionamiento de las técnicas prospectivas mineras que condujeron al levantamiento sistemático de cortes geológicos como los de Stratchey (1719) y culminaron en cartografías geológicas como la de Smith (1815) que suponen los primeros logros científicos de la geología.

Durante todo el siglo XIX la cartografía geológica experimentó un gran avance en los países más desarrollados, y especialmente en las regiones mineras. De todas formas, el primer mapa dedicado específicamente a los recursos minerales es el Mapa Minero de Francia (CAILLEUX, 1875).

El término "metalogenia", del cual deriva el de "mapa metalogenético", es relativamente reciente, fue acuñado por L. de Launay hacia 1905 para nombrar la ciencia que estudia los yacimientos minerales. De Launay sostenía la importancia de situar los yacimientos minerales en su contexto geológico, teniendo en cuenta no solo los datos sobre su mineralogía y petrografía, sino también sobre la tectónica y paleogeografía; además, insistía en la necesidad de adquirir una visión suficientemente amplia de la geología de los dominios mineralizados que permitiera definir provincias metalogenéticas-metalíferas (LAGNY, 2007).

No fue sino hasta la segunda mitad del siglo XX, después de la Segunda Guerra Mundial, cuando la cartografía de recursos naturales alcanzó un momento de auge y trascendió el puro hecho minero, al amparo de nuevos criterios y métodos de investigación: había que explorar áreas grandes poco conocidas a la búsqueda de nuevos

yacimientos, y para ello era necesario extender y ordenar debidamente el conocimiento geológico y metalogenético.

Una de las principales regiones que se propuso explorar fue la Unión Soviética, dónde se levantaron los primeros mapas metalogenéticos. Los autores rusos consideraban que un mapa metalogenético debía mostrar preferentemente la génesis de los yacimientos, para lo que se requería un profundo conocimiento científico de la zona estudiada. Con todo, este tipo de cartografías resultaron poco efectivas por la gran carga subjetiva que implica clasificar los yacimientos según hipótesis genéticas.

De todas formas, durante de la celebración del XX Congreso Geológico Internacional de México en 1956, se creó la Subcomisión del Mapa Metalogenético del Mundo. El trabajo de esta subcomisión fue muy fructífero, y gracias a ella, los distintos servicios geológicos nacionales de un gran número de países tomaron conciencia de la importancia de ordenar espacialmente, a escala global, el conocimiento de los yacimientos minerales. El objetivo era triple: poder inventariar las reservas y recursos, apoyar las teorías metalogenéticas sobre un número suficiente de datos, y por último plantear las investigaciones mineras a partir de bases más científicas (SIERRA LÓPEZ, 1971). De este modo tuvo lugar una eclosión de orden mundial en la publicación de este tipo de mapas. Uno de los países pioneros fue Francia, donde el BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) realizó el mapa de Yacimientos minerales de Francia a escala 1:320.000 en 15 hojas publicado entre 1960 y 1964. Esta cartografía incluía, parcialmente, territorio español y en su realización colaboró el IGME.

Otro hito importante fue la iniciativa de la UNESCO de realizar el mapa metalogenético de Europa a escala 1:2.500.000 en 9 hojas, iniciada en 1960 por la Comisión del Mapa Geológico del Mundo (CCGM), y que se publicó en el año 1984, acompañada de una memoria explicativa. En España, la Comisión Nacional de Geología fue el organismo encargado de coordinar los trabajos.

3. LOS TIPOS DE MAPAS DE RECURSOS MINERALES

Los mapas que tienen como objetivo la representación de los yacimientos minerales son, lógicamente, muy variados. Existe una amplia diversidad de contenidos científicos y técnicos, escalas, sustancias minerales, territorio estudiado y de objetivos concretos a representar. Algunos de ellos contienen conceptos teóricos muy subjetivos, especialmente los relacionados con las hipótesis genéticas de los yacimientos minerales, de las que se extrapolarán las posibles zonas donde encontrar nuevos yacimientos minerales.

De todas formas, se pueden, clasificar según su menor a mayor grado subjetividad en:

- **Mapas Mineros**, que muestran la distribución de las producciones y reservas de los recursos minerales. Sobre una base topográfica y/o geológica simple, se representan las explotaciones activas (o inactivas de gran magnitud), expresando el recurso producido y la importancia de la producción y, ocasionalmente, las vías de comunicación, centros de consumo, plantas metalúrgicas. En ellos se representan todo tipo de explotaciones y producciones mineras de forma tal que quede patente las relaciones de intercambio económico relacionadas con los recursos minerales. Estos mapas suelen realizarse a escala nacional, continental o global. Por su contenido geo-económico, rápidamente cambiante, quedan obsoletos con rapidez y requieren una revisión periódica. Su principal valor es que suministran una estimación de la dotación mineral de un país o territorio, y su actualización es fácil (LOCUTURA, 2000). En España el IGME ha realizado los mapas Mineros a escala 1:1.000.000 en los años 1934, 1936, 1964 y 1987.

- **Mapas de Yacimientos Minerales**, que proporcionan datos sobre las mineralizaciones de un área, mostrando los datos intrínsecos de las concentraciones minerales representadas, de carácter lo más objetivo posible. En ellos no se establecen relaciones con el marco geológico, por lo que la base geológica sobre la que se sitúan es muy simple y en ellos no se realizan hipótesis sobre su génesis y distribución. Un ejemplo de este tipo de mapas lo constituye el mapa de yacimientos minerales de Francia a escala 1:500.000.

- **Mapas Metalogenéticos**. Aquellos que, reagrupando e interpretando numerosos datos tienden a poner en evidencia la distribución de las concentraciones minerales con relación al marco espacio-temporal (ROUTIER, 1963); es decir, pretenden relacionar los yacimientos con la geología para deducir sus leyes de distribución y aplicar éstas a la prospección minera. En ellos se representa, sobre una base geológica, todos los indicios y depósitos minerales de un área determinada; a esta información básica se le superpone otra capa con información complementaria que ayuda al más completo conocimiento de los recursos minerales de la zona. Estos mapas muestran todos los recursos de minerales metálicos, minerales industriales y combustibles fósiles sólidos; en ocasiones se han incluido los hidrocarburos, las aguas termales e incluso las rocas industriales.

La evolución de las teorías metalogenéticas se ha reflejado inevitablemente en la cartografía metalogenética, y así, hay mapas muy complejos con profusión de datos metalogenéticos, en los que se definen los metalotectos y/o de modelos genéticos. Cuanto mayor sea la carga interpretativa de un mapa metalogenético menor será su validez temporal, pero mayor su utilidad inmediata.

Se entiende por **metalotecto** (LAFITTE *et al.*, 1965; PERMINGEAT & ROUTHIER, 1965; ROUTHIER, 1983), como cualquier rasgo geológico, ligado a la tectónica, a la litología, a la sedimentología, etc., que haya podido condicionar la presencia de una concentración mineral de determinadas características en un determinado lugar. El metalotecto, relaciona así la mineralización con su entorno geológico, condición indispensable para considerar un mapa metalogenético como tal.

De todas formas, estos conceptos fueron, en cierta manera, reemplazados por el concepto de **modelo metalogénico** (COX & SINGER, 1986), entendido como una representación simplificada de un tipo de yacimiento mineral. En general, los modelos se dividen en: empíricos, conceptuales, a escala o cuantitativos. La modelización de yacimientos se ha convertido en una herramienta de exploración regional cada vez más utilizado en zonas geológicamente bien estudiadas.

A su vez, se han realizado muchos tipos de mapas metalogenéticos. Algunos son autoexplicativos, en hojas sueltas con información muy básica, casi marginal y otros, son mapas metalogenéticos acompañados de una amplia memoria explicativa. En cualquier caso, la información que aportan es proporcional al grado de conocimiento que se tiene de la zona. Ejemplos de estos últimos son los de la escuela francófona (e.g., Francia, Marruecos, Túnez), con una leyenda muy completa, pero a veces de difícil lectura, y una representación gráfica muy compleja que persigue compendiar, en un solo símbolo, datos paragenéticos, morfológicos, genéticos, de alteraciones, ganga, rocas encajantes. De esta forma, los mapas de áreas con alta densidad de indicios minerales resultan ser una superposición de símbolos que ocultan la base geológica. Es por ello que la tendencia actual de la cartografía metalogenética, fundamentalmente de la escuela anglosajona (EE.UU., Canadá, Irán, Egipto), pretende ofrecer mapas relativamente simplificados pero acompañados de una importante documentación complementaria, geológica y metalogénica, en la que se incorpora una gran cantidad de datos. Cualquiera de estas modalidades de cartografía metalogenética suele incorporar un listado completo de los indicios minerales con los datos más relevantes: denominación, situación, mena, morfología o importancia económica (TORNOS *et al.*, 2005).

En lo que respecta a escala, ésta varía fundamentalmente en función del ámbito geográfico a que se estudie.

- **Mapas de potencialidad minera**, que tienen como objetivo identificar áreas con un alto potencial minero, basándose en el análisis de la distribución y magnitud de los yacimientos ya conocidos, teniendo en cuenta únicamente la extensión espacial de las litologías, u otras estructuras en las que se aloja la mineralización. En España, este tipo de mapas se han denominado mapas previsores de mineralizaciones.

- **Mapas metalogenéticos predictivos** (Predictive Mapping of Mineral Prospectivity, PMMP, en inglés). Este tipo de mapas han alcanzado en la actualidad un gran desarrollo. La implementación de nuevas técnicas informáticas cada vez más sofisticadas y fáciles de utilizar ha permitido el análisis conjunto de los datos de exploración minera en forma de bases de datos y/o en capas de información georreferenciadas (SIG). El objetivo principal de estos mapas es elaborar un mapa que represente la distribución espacial de un indicador numérico de favorabilidad a la presencia de un yacimiento mineral, al que se llama Índice de Potencialidad Minera (IPM). Con ello se proporciona al experto un documento que permite a los responsables de las campañas de exploración minera seleccionar zonas de interés para proponer opciones estratégicas y limitar los costes de exploración.

En cartografía predictiva se han desarrollado dos métodos principales distintos: por una parte los modelos llamados “*expert driven*”, que utilizan información basada en el conocimiento de especialistas en ese tipo de modelos de yacimientos y de exploración minera e incluyen a la suma ponderada, lógica booleana y difusa y funciones de Dempster-Schafer (RIGOL-SÁNCHEZ *et al.*, 2011). Por otra parte, los modelos “*data driven*” utilizan información objetiva procedente de las campañas de investigación minera, se basan en relacionar los datos disponibles y después de una eventual ponderación, darles un valor, que se traducirá en la favorabilidad. Uno de los métodos más comunes es el de *Weight of Evidence* (WoE), aunque también se utiliza la regresión logística y las redes neuronales artificiales o la Cell Based Association (TOURLIÈRE *et al.*, 2016).

4. LA CARTOGRAFÍA DE RECURSOS MINERALES EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

La Península Ibérica forma una única unidad geológica, así, desde mediados del siglo XIX se han realizado distintas ediciones de mapas geológicos completos de ella; sin embargo, los mapas de recursos minerales han sido siempre mapas de ámbito exclusivamente estatal y no hay cartografías de este tipo que abarquen ambos países; por lo tanto, en este trabajo se describen de forma separada las cartografías españolas y portuguesas.

4.1. La cartografía de recursos minerales en España. Una obra del IGME

En España, la pérdida de las colonias americanas a principios del siglo XIX supuso la suspensión del suministro de recursos minerales que con tanta facilidad habían llegado del Nuevo Mundo durante tres siglos, y obligó a investigar las riquezas mineras peninsulares. En este contexto se creó la Dirección General de Minas en 1825 encargada del fomento de la minería. Además, se promulgaron unas nuevas leyes mineras que liberalizaron el sector y permitieron la llegada de capitales privados, lo que permitió que se iniciara el que llegaría a ser el gran florecimiento minero de la España del XIX. En este contexto el ingeniero de minas francés Frédéric Le Play, fue comisionado por la Dirección de Minas francesa, con el objetivo de reconocer las riquezas mineras del suroeste de España. Para ello, Le Play acompañó su informe

con un mapa que sin duda alguna es el primer mapa geológico y minero de España, antecedente directo de los mapas metalogenéticos actuales (BOIXEREU, 2008, 2016).

En 1849 se creó la Comisión de la Carta Geológica de Madrid y General del Reino, antecedente del actual IGME. En la exposición de motivos del decreto fundacional se declara que su objetivo principal es el conocimiento integral de los recursos naturales del país. Sin embargo, en las primeras cartografías realizadas por la Comisión no se indican los recursos mineros. De todas formas, hay que señalar que, de forma temprana, la Comisión llevó a cabo un plan de investigación específico para estudiar las cuencas carboníferas, gracias al cual se levantaron cartografías geológicas-mineras en San Joan de les Abadeses (Girona), Maestre (1855), a escala 1:50.000 y otro en el Norte de la provincia de Palencia, Prado (1861), a escala 1:100.000, acompañado de una serie de cortes geológicos.

Con posterioridad, ocasionalmente, algunos mapas geológicos provinciales, se acompañaron de mapas geológicos en los que se cartografiaban detalladamente los yacimientos mineros, como es el caso del mapa geológico de Cáceres de Egozque y Mallada (1876).

De todas formas, los primeros mapas mineros de España, son posteriores. Hacia los años 1930 se publicaron dos ediciones consecutivas del mapa geológico-minero de España de 1934 (escala 1:1.500.000) y de 1936 (escala 1:2.500.000), en los que sobre una base geológica, se indicaban las principales minas, con indicación de la sustancia explotada (Figura 1).

Con la aprobación del Plan Nacional de Investigación Minera (PNIM) en 1969, se promovió la exploración minera y las infraestructuras geológicas y mineras para suministrar las bases para el establecimiento fundamentado de estrategias de exploración de la Administración estatal y así incentivar la exploración de las empresas privadas (LOCUTURA, 2000). En este contexto político se realizó el **Mapa Metalogenético de España a escala 1:200.000** en 93 hojas, y que se publicó en 1972.

Se eligió la misma escala de la cartografía geológica de síntesis que se estaba acometiendo al mismo tiempo, y que se utilizó de base geológica. Sobre ella se superpusieron los indicios minerales mediante símbolos que mostraban el tamaño, la morfología, la mena, el quimismo de la mena y ganga, la roca encajante, el proceso genético, datos económicos y la edad. Una breve memoria anexa incluía las referencias bibliográficas y un listado de indicios con las principales características. Pero la característica más importante de estos mapas es que se representaron los metalotectos, ya fueran éstos comprobados (bien definidos), probables (por analogía de contexto geológico y continuidad física con un metalotecto comprobado y presencia de indicios) y posibles (analogía de contexto geológico y rareza o ausencia de indicios) (Figura 2).

Debido a los cortos plazos de realización del proyecto; en los tres años de trabajo no se pudieron realizar campañas sistemáticas de campo para reconocer los indicios por lo que la mayoría de éstos fueron definidos a partir de referencias bibliográficas y de expedientes de las Jefaturas provinciales de Minas. A pesar de todo, aquella primera edición del Mapa Metalogenético de España resultó ser obra fundamental para el conocimiento global de la metalogenia y la distribución de yacimientos en España y una herramienta útil para la definición y selección de áreas favorables que más tarde fueron objeto de planes sectoriales de investigación de las sustancias declaradas prioritarias por el PNIM. La edición de este serie cartográfica situó a España entre un muy escaso número de países con una infraestructura similar y de esa resolución.

Inmediatamente después de haber realizado la cartografía metalogenética, se realizaron los **Mapas Previsores de mineralizaciones de las sustancias prioritarias a escala 1:1.500.000**. Es necesario recordar que el objetivo del PNIM era concretar a nivel nacional el conocimiento de los recursos de sustancias entonces consideradas como prioritarias (Aluminio, Azufre, Bismuto, Plomo-Zinc, Cobre, Estaño,

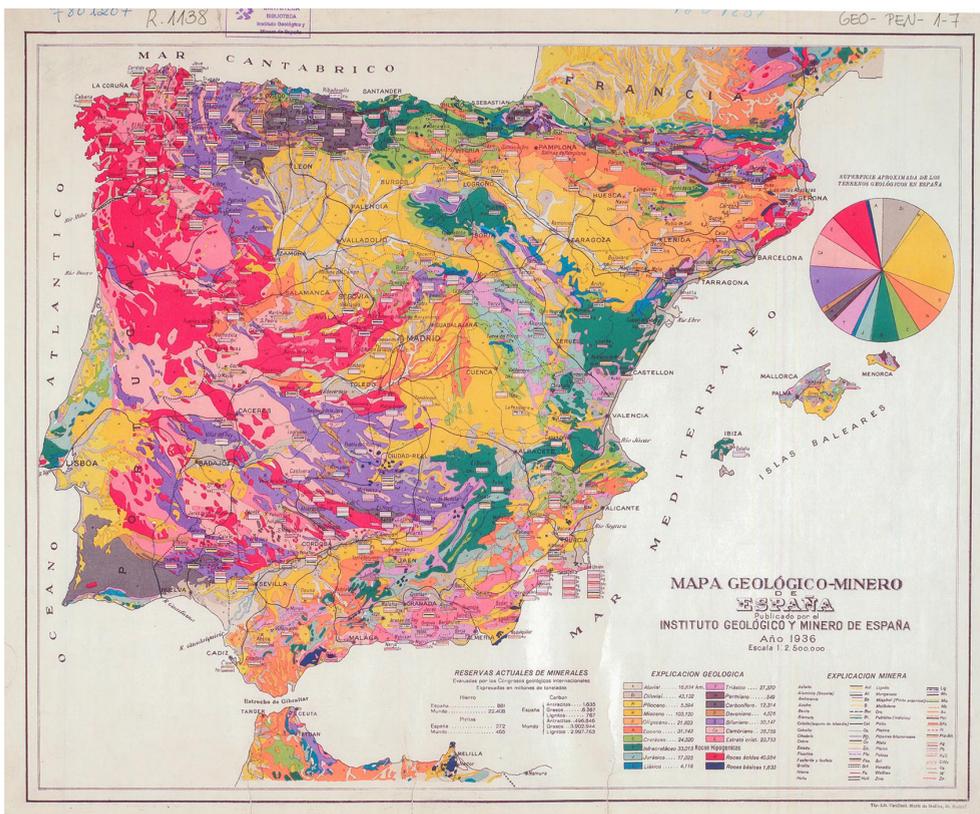


Figura 1. Mapa Geológico-Minero de España a escala 1:2.500.000. IGME (1936). Fuente: Biblioteca del IGME.

Fluorita, Fosfatos, Hierro, Hulla, Manganeseo, Mercurio, Niquel, Oro, Sales sódicas y potásicas, Titanio y Wolframio). Para ello era preciso, para cada sustancia, contemplar conjuntamente todas las áreas metalíferas y tener en cuenta qué características metalogenéticas pudieran condicionar su interés exploratorio. También se consideraba su potencialidad económica a escala mundial y/o nacional y se representaron las áreas prospectivas por separado (SIERRA LÓPEZ, 1971). Esta cartografía se basaba en definir la tipología de los principales yacimientos de cada sustancia y pretendía definir y representar las áreas prospectivas y su importancia económica relativa.

Se utilizó como base de representación para el mapa un fondo geotectónico simple sobre el que se incorporaron las principales mineralizaciones con indicación de su morfología, tipología genética y roca encajante. El centro fundamental de la representación era el área metalífera, es decir, la que resulta de la agrupación de los metalotectos. Cada memoria contaba con una tabla con una clasificación de yacimientos en las tipologías mundiales en la que se situaban los yacimientos españoles (Figura 3).

Esta serie cartográfica, desde el punto de vista conceptual se debe considerar como una **cartografía de potencial minero**.

Al finalizar la década de 1970, existía una gran preocupación sobre la disponibilidad de los recursos minerales. En este marco, se elaboró en 1978 el Plan Nacional de Abastecimiento de Materias Primas Minerales (PNAMPM) que contemplaba la

Revisión del Mapa Metalogenético de España a Escala 1:200.000. En esa década el conocimiento geológico del país había avanzado considerablemente, gracias al programa MAGNA de cartografía geológica sistemática a escala 1:50.000, que ya había cubierto buena parte de la superficie país. Además, organismos de la Administración y entidades privadas habían realizado numerosas campañas de exploración minera y así ampliado significativamente el conocimiento metalogenético.

El objetivo de esta segunda edición del mapa es inventariar y reconocer en el campo todas las explotaciones (activas e inactivas) e indicios mineros (metálicos, energéticos e industriales) de las que se tenga noticia. Pretende constituir un conjunto de información sistemática y de carácter objetivo, elaborado con criterios unificados.

Se recoge toda la información geológica sobre el indicio que sea posible. Además, se toman muestras de la mineralización para archivo y estudio, se realizan estudios microscópicos y análisis pertinentes y se elabora una ficha muy completa de cada indicio o yacimiento. Posteriormente se procede a la sistematización de datos (incluidos en bases de datos).

El mapa tiene una base geológica más elaborada que en la serie precedente. Sobre ella se sitúan los indicios y depósitos con una simbología sencilla que solo indica la sustancia, morfología y tamaño. Este mapa se acompaña de un esquema metalogenético a escala 1:500.000 y que representa los principales metalotectos y dominios, con indicación de las mineralizaciones más importantes. En otro esquema se sitúan los lineamientos. Un tercer esquema representa el encuadre geológico de la hoja. El mapa tiene una leyenda geológica parecida a la del plan MAGNA y otra leyenda metalogenética donde las distintas menas vienen representadas por diferentes colores, las morfologías por simbologías cuyo tamaño depende de la importancia o categoría de los depósitos (ésta última definida en función de la sustancia y el tonelaje del yacimiento o indicio) y de la naturaleza de los metalotectos por símbolo alfabético (Figura 4).

La memoria es extensa e incluye síntesis geológica, descripción de indicios ordenados según las sustancias, una síntesis metalogenética, una historia minera y de exploración, un listado de indicios, la definición de tipos de mineralizaciones y metalotectos y la bibliografía.

Por el momento, se ha realizado la cartografía metalogenética en las principales zonas mineras de España, a escala 1:200.000, de las regiones norte, centro-occidental y suroriental de España, y en la confección de los mapas metalogenéticos específicos de algunas Comunidades Autónomas (Extremadura, Andalucía, Cantabria, Navarra, País Vasco o Murcia) (Figura 5).

Entre los años 1973-74. el IGME acometió otra importante serie cartográfica minera: el **mapa de rocas y minerales industriales a escala 1:200.000 (1ª edición)**. En estos mapas, sobre la base geológica se situaron las explotaciones y yacimientos mediante simbología y colores diversos. La simbología distingue el estado de explotación, un color en función de la utilización y un contorno circular cuyo tamaño variaba según el volumen de reservas, una clave alfabética indica la sustancia (Figura 6). El mapa se acompaña de unas memorias explicativas, específicas para cada hoja.

Del mismo modo que sucedió con los mapas metalogenéticos, a finales de los años 80 se inició una nueva serie cartográfica que incluía notables mejoras metodológicas. Esta nueva serie, más compleja, consta de dos mapas por cada hoja. El mapa de Situación de Explotaciones e Indicios se representa la totalidad de explotaciones, activas o no, las plantas de tratamiento y transformación sobre una base geológica. El mapa de Recursos, por su parte, representa además de las explotaciones, los “lito- tectos” o “mineralotectos”, áreas que delimitan complejos, unidades o formaciones susceptibles de contener depósitos de rocas y minerales industriales de potencial interés. Estos mapas también se acompañaban de una memoria, que en esta nueva

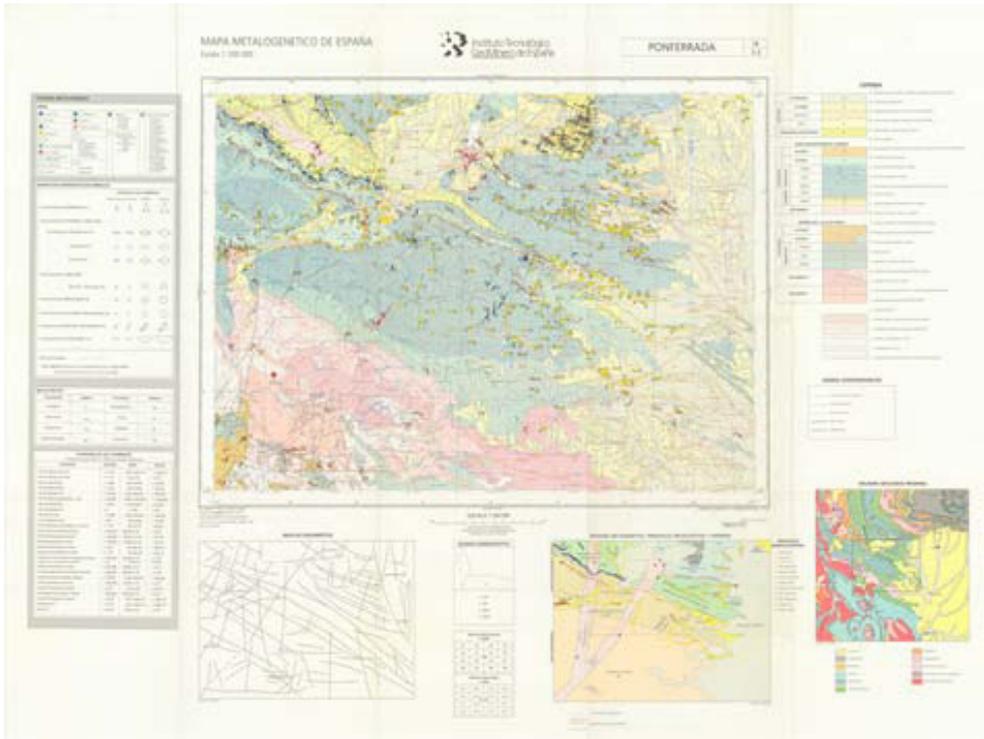


Figura 4. Mapa Metalogenético de España a escala 1:200.000 (2ª edición) Hoja nº 18 Ponferrada (IGME, 1993). Fuente: Biblioteca IGME.

edición era mucho más extensa. Se han realizado 24 hojas de esta edición del mapa (GARCÍA CORTÉS, 2000).

A partir del año 2000, gracias a convenios con distintas administraciones autonómicas, los mapas de Rocas y Minerales Industriales se realizaron con un nuevo formato. Esta serie presenta, generalmente, un único mapa. Debido a la gran extensión que tienen algunas comunidades autónomas, a pesar de que la escala de trabajo es de 1:200.000, se optó por editarlos a escala menor, 1:400.000. La memoria que los acompaña es también, mucho más extensa. Hasta la fecha se han realizado los mapas de Asturias, Galicia, Cantabria, Andalucía, la Cuenca Vasco-cantábrica y Castilla y León.

4.3. Los mapas de recursos minerales en Portugal

En Portugal, existió desde los inicios, una preocupación por la “cartografía geológica clásica” que dotó al país del conocimiento de base sobre la naturaleza, estructura (composición mineralógica, química, litológica, estructural, etc.) de su subsuelo, permitiendo estimar sus potencialidades en recursos y, geodinámica, correspondiendo, por lo tanto, a un instrumento fundamental para la ordenación del territorio en todas sus vertientes - económica, ambiental y social. Los mapas son así instrumentos técnico-científicos fundamentales para:

1. Valorización económica de los recursos endógenos: Base de información para la prospección y exploración de los recursos minerales y energéticos, abastecimiento de aguas y agricultura.

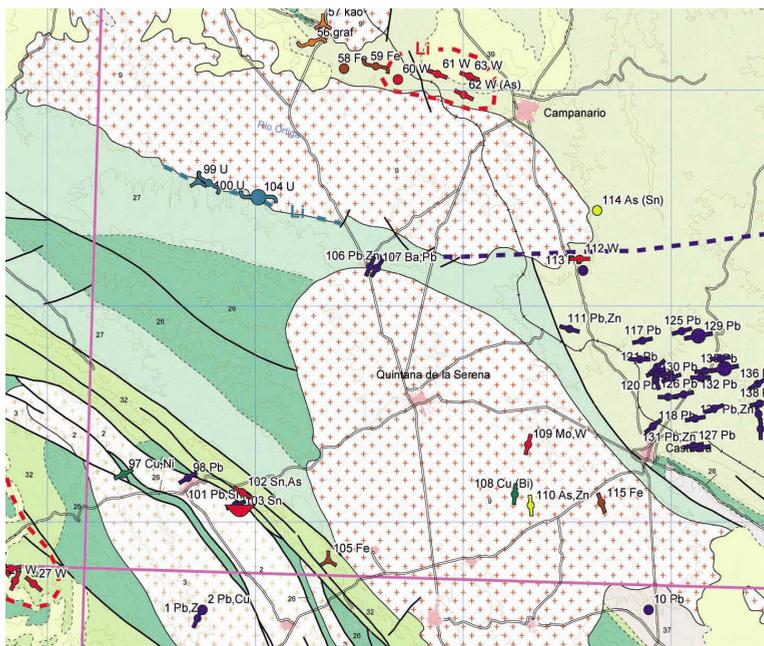


Figura 5. Detalle del mapa metalogénico de Extremadura (IGME-JEx, 2005).

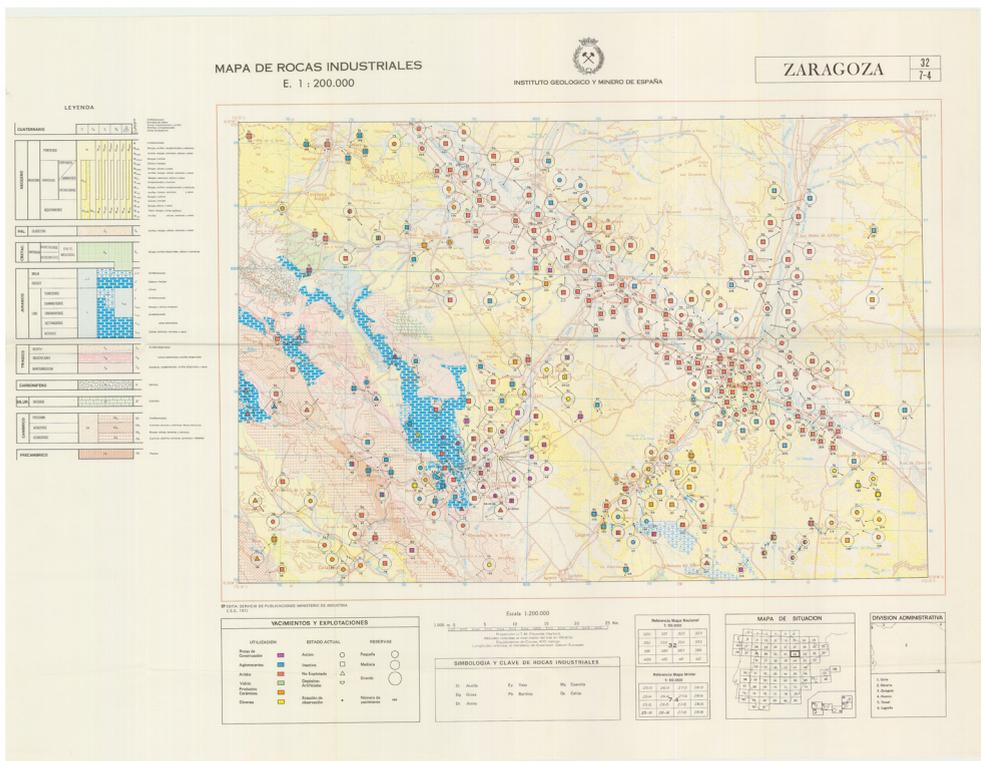


Figura 6. Mapa de Rocas Industriales Hoja nº 32 Zaragoza (IGME, 1972).

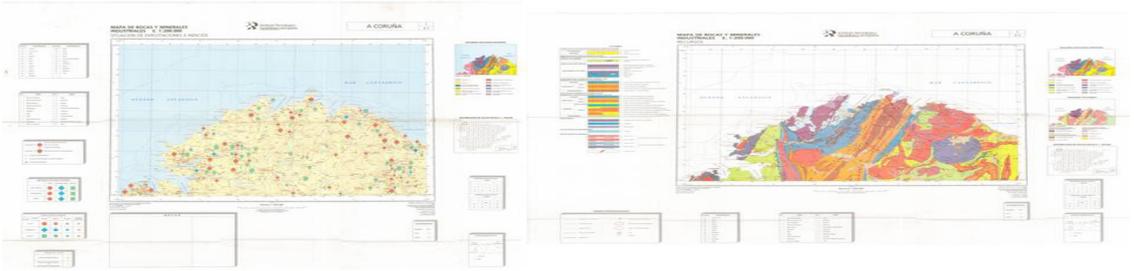


Figura 7. Mapa de rocas y minerales industriales a escala 1:200.000. Hoja nº 1 A Coruña (IGME, 1998). Se presenta en dos hojas, la situada a la izquierda indica la situación de las explotaciones, la de la derecha los “litotectos”.

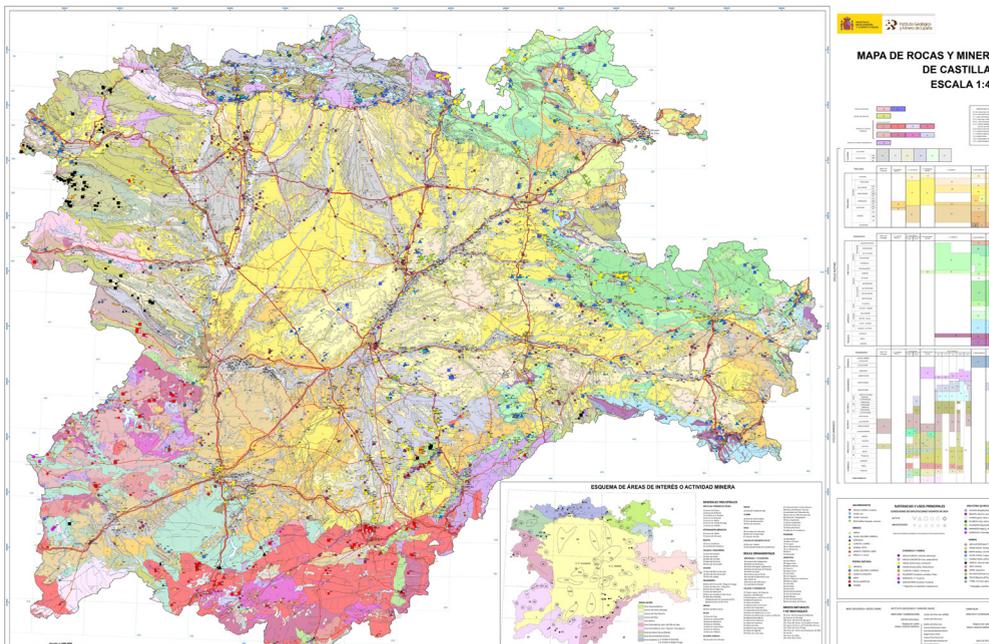


Figura 8. Mapa de rocas y minerales industriales de Castilla y León a escala 1:400.000. IGME-JCYL (2016).

2. Apoyo a las políticas públicas: Soporte a la planificación territorial y de las obras públicas.

3. Valorización del Territorio: Previsión y remedio de los riesgos geológicos y tecnológicos, inventario y defensa del patrimonio geológico; estudios científicos y didácticos.

La localización de los yacimientos e indicios minerales en Portugal está referenciada por la base de datos “*Sistema de Informação de Ocorrências e Recursos Minerais Portugueses*” (SIORMINP) (Figura 9) estando la misma disponible en el Geoportal del LNEG (<http://geoportal.lneg.pt>).

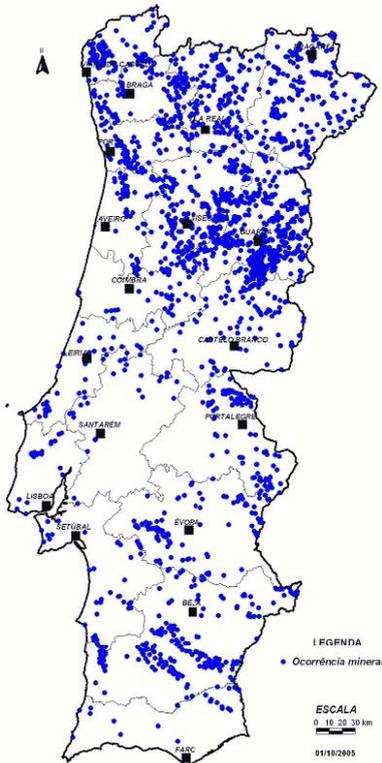


Figura 9. Base de datos SIORMINP con la localización de los 2272 indicios minerales conocidos en Portugal (<http://geoportal.lneg.pt>).

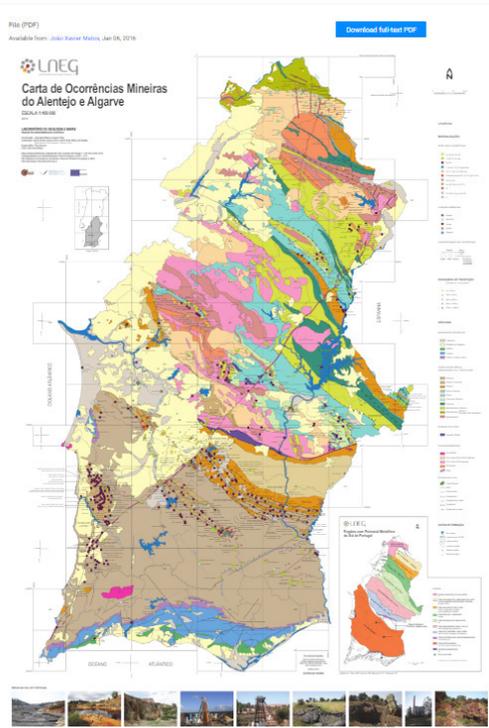


Figura 10. “Carta de Ocorrências Mineiras do Alentejo e Algarve” a escala 1:400.000.

La base de datos SIORMINP está organizada por elementos y sustancias tanto de minerales metálicos como de no metálicos. Debido a su complejidad y a la abundante información agregada (ex. Nombre, Sustancia principal, Mineralogía, Dimensiones, Morfología, Reservas, Producción histórica, entre otras) tiene todo el sentido trasladar al mapa de forma sintética esta información de forma gráfica.

Así, no obstante, los primeros mapas elaborados ya mencionados, como los de Thadeu en la **década de** los 60 y anexos a los mapas geológicos, hojas 1 y 2 de 1992 y 2006, respectivamente, se inició un programa de cartografía de los recursos metálicos en el sur de Portugal con la publicación de la “Carta de Ocorrências Mineras del Alentejo y Algarve” a escala 1:400.000 (MATOS & FILIPE, 2013) (Figura 10).

En los últimos años, se ha acometido una nueva campaña de cartografía de recursos minerales metálicos y no metálicos.

Respecto a los minerales metálicos, sobre la cartografía de las hojas 1:200.000, se reclasificaron los 2272 indicios minerales conocidos y se elaboró el Mapa de Yacimientos Minerales de Portugal (Zona Norte) a escala 1:200.000 (Figura 11).

Próximamente se realizarán y publicarán las hojas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 del Mapa de yacimientos Minerales de Portugal a escala 1:200.000, que servirán de base para la realización del Mapa de Yacimientos Minerales de Portugal a escala

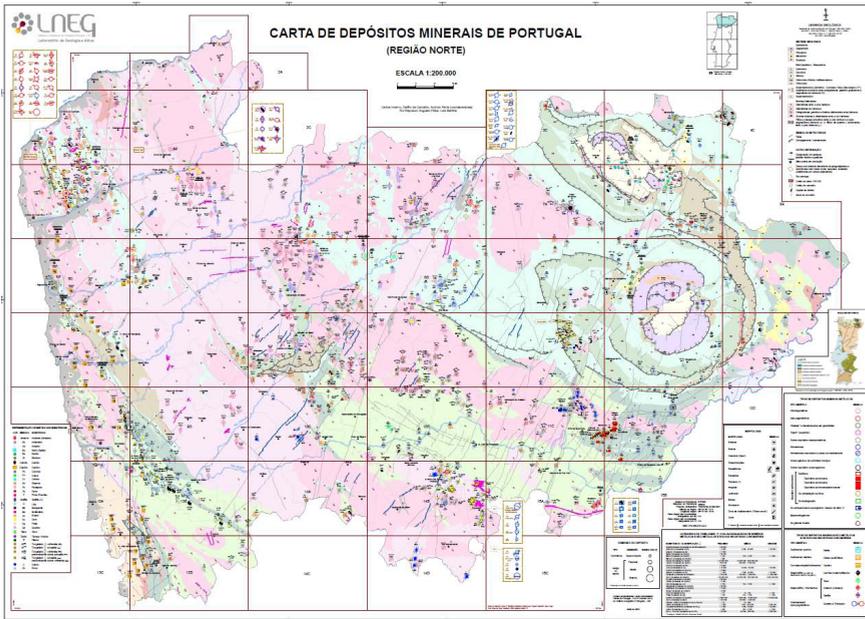


Figura 11. Carta de Depósitos Minerais (Região Norte) (INVERNO *et al.*, 2015).

1:500.000. Éste es el último objetivo que se ha propuesto el LNEG en su misión de cartografía minera.

Respecto a los recursos no-metálicos y minerales industriales, cabe señalar el Mapa de Recursos arcillosos de la *Orla Ocidental e Bacias Interiores* (Orla Occidental y Cuencas Interiores) resultado del estudio efectuado en distintos yacimientos arcillosos de esa zona. En cada área se obtiene una columna litoestratigráfica, que sintetiza el conocimiento disponible en términos espaciales y temporales de los materiales arcillosos, conjuntamente con la información de variabilidad de sus características (mineralogía y propiedades tecnológicas) definiéndose una Columna Tipológica alojada en el centro geométrico del horizonte estratigráfico estudiado. Esta hace de puente entre la columna litológica y la tipología de las materias primas arcillosas.

En la definición de la Columna Tipológica de cada área estudiada, construida sobre promedios de resultados de muestreos realizados sobre la estratigrafía geológica, se consideraron las afinidades de los niveles arcillosos con base en sus características mineralógicas y tecnológicas. Para ello se identificaron los minerales no arcillosos (cuarzo y feldespato) y arcillosos (illita, caolín e interestratificados). En el ámbito de la tecnología se consideró la textura (fracciones $<2\ \mu\text{m}$, $2-63\ \mu\text{m}$, $>63\ \mu\text{m}$), el índice de plasticidad, la absorción de agua y la resistencia mecánica en crudo y cocido a $950\ ^\circ\text{C}$.

Esta herramienta permite (y si se utiliza de forma más intensiva a escalas de mayor detalle, permitirá) una mayor eficacia de resultados:

Distinguir los distintos rellenos arcillosos de las cuencas de sedimentación, tanto en términos de origen de los sedimentos (variación lateral), bien de diferenciación temporal (variación vertical), a escala regional;

Contribuir para la definición de una zonación sobre la cartografía geológica que potencie la selección de blancos para investigación de materias primas que cumplan especificaciones deseadas (elaboración de cartas de previsión);

Mejorar las prácticas de exploración a través de la gestión de “parques de materias primas” junto a los frentes de desmonte, aprovechando la diferenciación geológica que ha producido la naturaleza, expresada por la Columna Tipológica (OLIVEIRA & LISBOA, 2014) (Figura 12).

En 2014 fue asimismo editado el Mapa Litológico y de Recursos Arcillosos de la Región de Torres Vedras-Bombarral, resultado de los trabajos de muestreo y caracterización de LISBOA *et al.* (2014).

5. UTILIDAD DE LA CARTOGRAFIA DE RECURSOS MINERALES

Las cartografías de recursos minerales implican la elaboración de un inventario completo de indicios y yacimientos minerales georreferenciado, su catalogación y su caracterización geológica, metalogenética y económica. Por ello son imprescindibles para la ordenación y planificación de las actividades mineras. Interesan tanto a las distintas administraciones públicas, como a las empresas privadas.

Además, la cartografía metalogenética es un buen ejemplo de cómo una herramienta creada y desarrollada con unos fines ha adquirido un valor infraestructural al revelarse útil en otros campos. El conocimiento sistemático de la distribución de las mineralizaciones en el espacio y sus relaciones con el entorno geológico se han revelado útiles en otros campos de actividad (LOCUTURA, 2000).

Así, en primer lugar, estos mapas han despertado gran interés en los medios académicos y para la **Investigación científica** ya que aportan información que ayuda a comprender el marco de los procesos geológicos y su evolución.

En segundo lugar, para los **estudios medioambientales** el conocimiento sistematizado de las características químicas y mineralógicas de las mineralizaciones y de sus tonelajes, leyes, laboreo, etc. permite determinar el grado de afección del territorio en áreas mineras abandonadas y diseñar los trabajos de restauración o remediación. Además, la información sobre las mineralizaciones es útil para conocer causas naturales de fondos geoquímicos anómalos.

En tercer lugar, el conocimiento de la distribución de los yacimientos minerales y su expectativa económica, tiene una gran importancia en la **Ordenación Territorial**. Hay que tener en cuenta el potencial minero de una zona antes de hipotecar su uso con infraestructuras que lo podrían inutilizar. Por otra parte, el conocimiento de la distribución de las antiguas labores mineras puede ayudar a las distintas administraciones a una mejor planificación, pues hay que tener en cuenta que los huecos mineros son un riesgo potencial debido a las posibles subsidencias, deslizamientos en escombreras, o roturas de balsas.

Además, en la actualidad existe un gran interés en la gestión y aprovechamiento de los espacios subterráneos. Los huecos generados en minería, una vez abandonados, pueden ser un lugar dónde almacenar residuos, por una parte mineros, y también de otra procedencia.

Por último, la existencia de información sistematizada sobre las antiguas minas es útil en varios campos, por una parte, sirve de base para los estudios sobre el **Patrimonio Minero** que pueden representar las instalaciones, y también para el **Patrimonio Geológico** que pueda representar la posible mineralización que allí aflora. **Patrimonio Minero:** El mapa metalogenético inventaría todas las minas antiguas con lo que se confecciona una base de datos referenciada fundamental para realizar estudios sobre el patrimonio minero de una región. Además incluye un capítulo sobre la historia minera de la zona comprendida.

6. CONCLUSIONES

El cartografiar los recursos minerales de un territorio es una actividad que se remonta al origen de la historia, de hecho, uno de los mapas más antiguos que se conservan es un mapa geológico-minero: el papiro de Turín (1.150 a.C.). Además, es indudable que el desarrollo de la Geología como ciencia ha estado estrechamente vinculado a la minería, por lo que los primeros mapas geológicos han tenido siempre un carácter minero.

La cartografía de recursos minerales es muy variada, y en ella se consideran mapas de muy diversa índole y objetivos. De todas formas, se pueden clasificar, de menos a más grado de interpretación metalogenética teórica entre: mapas mineros, mapas de yacimientos minerales, mapas metalogenéticos, mapas de potencial minero y finalmente, los mapas metalogenéticos predictivos.

A pesar de que el principal objetivo de la cartografía metalogenética es la exploración minera de grandes territorios, ésta ha demostrado ser una herramienta muy útil en otros campos como la Investigación científica básica, la educación, la ordenación territorial, los estudios medioambientales y los estudios de Patrimonio Geológico e Industrial, entre otros.

En la actualidad, gracias a los grandes avances en informática y SIG, está alcanzando un gran desarrollo las Cartografías Metalogenéticas Predictivas, que intentan expresar con un índice numérico, la probabilidad de encontrar un yacimiento mineral en un determinado territorio.

Los mapas de recursos minerales se han realizado preferentemente dentro de un ámbito estatal y no hay cartografías de este tipo que abarquen la península ibérica como unidad geológica. En cada país los objetivos y metodologías han sido distintos. En Portugal los mapas son de carácter más objetivo, fundamentalmente mapas de indicios mineros, mientras que la tendencia en España es la de elaborar una cartografía metalogenética con una mayor carga conceptual.

De aquí que puede tener una gran utilidad el desarrollar un producto cartográfico de la península Ibérica que abarque tanto el componente minero, en el sentido económico, como la distribución de los yacimientos mineros sobre la base geológica y así poder elaborar una moderna cartografía metalogenética predictiva.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ MUÑOZ, E. 2004. *Filosofía de las ciencias de la tierra. El cierre categorial de la geología*. Biblioteca Filosofía en español. Fundación Gustavo Bueno. Pentalfa Ediciones. Oviedo. 352 págs.
- BOIXEREU VILA, E. 2016. *Evolución histórica de la cartografía geológica en España: desde sus orígenes hasta los mapas de Verneuil y Collomb (1864) y Maestre (1864)*. Tesis doctoral inédita. Universidad Politécnica de Madrid. 487 pp.
- BONHAM-CARTER, G.F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon, Oxford, 398 p.
- CASSARD, D., BERTRAND, G., BILLA M., SERRANO J.J., TOURLIÈRE B., ANGEL J.M. & GAÁL G. 2015. WEIHED, P. Ed., *3D, 4D and Predictive Modelling of Major Mineral Belts in Europe, Mineral Resource Reviews*, DOI 10.1007/978-3-319-17428-0-2 Springer International Publishing Switzerland 2015.
- COX, D.P. & SINGER, D.A. 1986. *Mineral Deposits Models*. U.S. Geological Bulletin nº 1696. 400 págs.
- EGOZQUE, J. & MALLADA, D.I. 1876. Memoria Geológico Minera de la provincia de Cáceres. *Memorias de la Comisión del Mapa Geológico de España*. 4.
- GARCÍA CORTÉS, A. 2000 La cartografía geológica y temática del ITGE: una experiencia sesquicentenario con vigencia actual y vocación de futuro. *In: Ciento cincuenta años.*

- Estudio e investigación en las Ciencias de la Tierra*. A. HUERGA, Ed. 103-132. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. 320 págs.
- INVERNO, C., DE CARVALHO, D., PARRA, A., REYNAUD, R., FILIPE, A. & MARTINS, L. 2015. *Carta de Depósitos Mineraiis (Região Norte)*, LNEG.
- LAGNY, P. 2007. De la Geologie aux Geosciences. Les substances utiles: la métallogénie. *Geochroniche*, **101**: 42-44.
- LISBOA, J.V., SARDINHA, R. OLOIVEIRA, A. & CARVALHO, J.F. 2014. Cartografia e caraterização composicional cerâmica de argilas comuns da região de Torres Vedras – Bombarral. *Geonovas* 28, 2014, 121-141.
- LOCUTURA RUPÉREZ, J. 1999. La investigación minera en España desde los planes de desarrollo a la actualidad. Contribución del IGME. In: *Ciento cincuenta años. Estudio e investigación en las Ciencias de la Tierra*. A. HUERGA Ed. 133-150. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. 320 págs.
- 2000. El mapa metalogenético de España. Evolución, Utilidad y Demanda. *Boletín Geológico y Minero*. **111**: 151-168.
- MATOS, J.X. & FILIPE, A., Coord. 2013. *Carta de Ocorrências Mineiras do Alentejo e Algarve à escala 1:400.000, versão digital*. Edição LNEG/ATLANTEIRA, Lisboa. ISBN: 978-989-675-029-9, Colaboração: D. OLIVEIRA, C. INVERNO, C. ROSA, M.J. BATISTA, Z. PEREIRA, R. SALGUEIRO, T. CUNHA, F. BARREIRA.
- OLIVEIRA, A. & LISBOA, V. 2014. *Carta de depósitos argilosos da Orla Ocidental e Bacias Interiores. Litoestratigrafia e Tipologia (Mineralogia e Propriedades Tecnológicas), Escala 1:300.000*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- RIGOL-SÁNCHEZ, J.P., CHICA OLMO, M., RODRÍGUEZ GALIANO, V.F. & PARDO IGÚZQUIZA, E. 2011. Cartografía predictiva mediante SIG de depósitos epitermales de oro en Cabo de Gata, Almería, España. *Boletín Geológico y Minero* **122 (4)**: 517-530.
- SIERRA LÓPEZ, J. 1971. Los mapas metalogenéticos de España. *Industria Minera* **121**: 5-27.
- TORNOS, F., RUIZ MONTES, M., BEL-LAN, A., BOIXEREU E., FLORIDO, P., GARCÍA-CORTÉS, A., GUMIEL, P., LOCUTURA, J., LOPERA, E. & NAVAS, J. 2005. *Normas para la realización del Mapa Metalogenético de España*. IGME. Documento Interno.
- TOURLIÈRE B., PAKYUZ-CHARRIER, E., CASSARD, D., BARBANSON, L. & GUMIAUX, C. 2015. Cell Based Associations: A procedure for considering scarce and mixed mineral occurrences in predictive mapping. *Computers and Geosciences*, Elsevier, **78**, p. 53-62.
- TOURLIERE, B., MELLETON, J. & GLOAGUEN, E. 2016. Estimer le potentiel minier métropolitain: les approches géostatistiques et de modélisation. La cartographie minérale prédictive. *Géochronique*. 138: 22-29.