

Anexo 1

RESUMEN DEL PROYECTO

MINLIFE trata de comprender el papel que desempeñan los microorganismos del subsuelo en la génesis de los depósitos minerales secundarios, utilizando como modelo uno de los mejores ejemplos actuales de biomineralización: el contacto entre el Devónico tardío y el Carbonífero temprano del yacimiento de sulfuros masivos volcanogénicos de la mina Las Cruces (Sevilla). Este proyecto es una oportunidad única para cubrir una importante laguna en el conocimiento de la Biosfera Profunda, ya que las rocas susceptibles de estudio desaparecerían en un futuro próximo. Se trata de un proyecto multidisciplinar en el que se ha utilizado la información geológica, geoquímica y microbiológica para desarrollar un modelo geomicrobiológico que explique la mineralización secundaria en Las Cruces. La caracterización de la diversidad microbiana y sus productos metabólicos, en combinación con la geoquímica isotópica y las asociaciones minerales, nos ha dado una amplia visión de los diferentes nichos ecológicos presentes en la zona, su papel en los procesos de mineralización y sus vínculos a través de los acuíferos o la desgasificación. Desde el punto de vista microbiológico, los ecosistemas microbianos encontrados en el subsuelo están sustentados principalmente por arqueas metanógenas y bacterias sulfatoreductoras (SRB). Esto supone que la producción de metano y la reducción de azufre son las vías metabólicas más importantes en este ecosistema y las principales responsables de la precipitación de metales pesados acomplejados con sulfato. Mientras que esto ocurre en las zonas anaerobias, en las regiones donde se filtra oxígeno, el azufre es oxidado a sulfato por bacterias oxidadoras de azufre (SOB) y el metano oxidado por bacterias metanotrofas. Los análisis microscópicos (SEM/TEM con XRD y EPMA), la espectrometría de masa de iones secundarios (SIMS y Nano-SIMS), así como los análisis de biomarcadores, demuestran la existencia de una próspera comunidad microbiana, tanto viva como fosilizada, asociada a la mineralización, aportando pruebas directas e indirectas de interferencia biológica en toda la mineralización secundaria. Los procariotas fósiles encontrados se conservaron debido a un evento masivo de precipitación de galena que, probablemente, fue fomentado y acelerado indirectamente por la actividad biológica. Estas interacciones entre las comunidades microbianas y el yacimiento mineral no se han detectado en ningún otro sitio a lo largo de la Faja Pirítica Ibérica. Las Cruces es realmente un yacimiento único en el que el desarrollo de una abundante comunidad microbiana tras su enterramiento durante el Messiniense ha sido el factor clave para sus singulares conjuntos minerales. MINELIFE tendrá implicaciones industriales directas, ya que el estudio de la geomicrobiología de los yacimientos secundarios tiene repercusiones en el desarrollo de estrategias para la exploración de minerales mediante la biogeoquímica de rocas y, sobre todo de acuíferos lo que permitirá identificar especies marcadoras que identifiquen la mineralogía del subsuelo.

LOGROS DEL PROYECTO EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS DEL IGME

-Se ha realizado un amplio **estudio geológico**, con análisis isotópicos de Cu y Ag suponiendo un gran avance en la localización de mineralizaciones secundarias que no impliquen sondeos previos, buscando los beneficios potenciales para la sociedad en el ámbito de las explotaciones mineras.

-**Estudio geomicrobiológicos e hidroquímicos:** Se han realizado muestreos en relación con i) el acuífero Niebla-Posadas, que atraviesa todo el yacimiento distinguiéndose las aguas intersticiales de Mioceno y Paleozoico, realizando seis muestreos estacionales anuales en época de aguas altas y bajas en 10 puntos de extracción repartidos a lo largo de la corta; ii) las diferentes mineralogías secundarias presentes en el yacimiento (gossan rojo y negro, zona de cementación, zona de galena y la zona de margas) a partir de dos muestreos realizados a finales de 2019 y 2020. Tras un minucioso estudio de los trabajos anteriores y de la bibliografía, se realizaron otras dos campañas de obtención de muestras para los análisis de geoquímica orgánica y biológica con el fin de comparar el yacimiento de Las Cruces con otros potencialmente similares de toda la Faja Pirítica Ibérica (FPI). Además, se han realizado 4 muestreos adicionales en la FPI y otros 5 en minas de Chile y Cantabria. Asimismo, se han desarrollado y mejorado los protocolos de extracción y amplificación de DNA y de genes ribosomales, ya que la gran cantidad de metales presentes en las muestras han dificultado en gran manera estos protocolos. Gracias a estos muestreos se ha podido caracterizar dos tipos de agua, con origen y características hidroquímicas muy diferentes

- Caracterización geomicrobiológica de la zona de mineralización secundaria:

La finalidad de esta actividad fue la obtención de los principales modelos geomicrobiológicos que se están produciendo en la zona de cementación del yacimiento mineral de Las Cruces. Para ello se obtuvo más de 60 librerías metagenómicas tanto de muestras del acuífero como de las muestras de las diferentes mineralogías que han dado lugar a la identificación de los principales metabolismos que se están dando en el yacimiento. Estos modelos hidrogeomicrobiológicos se han elaborado a partir de más de 2.000 análisis hidrogeoquímicos de las aguas del acuífero, mayoritariamente proporcionados por la mina Las Cruces. Además, se han obtenido más de 30 cultivos de microorganismos principalmente anaerobios presentes en las diferentes mineralogías muestreada.

-Se ha realizado un **análisis multivariante de los parámetros ambientales y la biodiversidad**, que nos ha permitido correlacionar la diversidad microbiana con los cambios ambientales. Como **avance tecnológico**, se ha desarrollado nuevos protocolos de tratamiento de muestras geológicas para estudios de biodiversidad del subsuelo.

-Difusión y divulgación: Se ha desarrollado una intensa labor de educación, promoción del aprendizaje y divulgación a través de la difusión de los resultados científicos del proyecto manteniendo numerosas reuniones científicas con el personal de las empresas mineras con las que hemos colaborado a lo largo del proyecto, divulgando el uso de los análisis isotópicos de Cu y Ag, en aguas relativamente superficiales como trazadores de la presencia de yacimientos de estos minerales, ya que el fraccionamiento isotópico en aguas relativamente oxidantes enriquece aguas abajo en isótopos pesados, lo que podría suponer un gran avance en la localización de mineralizaciones secundarias a través de tecnologías indirectas que no impliquen sondeos previos. Mediante estos seminarios y reuniones hemos trabajado para mejorar la comprensión científica y los beneficios potenciales para la sociedad en el ámbito de las explotaciones mineras.

Una de las actividades del proyecto ha sido promover **la formación docente e investigadora de estudiantes de postgrado y licenciatura** en el campo emergente de la geomicrobiología e hidroquímica. Los resultados tanto de la investigación como de temas relacionados con ambientes extremos han sido presentados a los alumnos de licenciatura a través de los Másteres que impartimos los miembros del equipo científico en las universidades Complutense y Autónoma de Madrid, mediante la dirección Tesis de Master y de Grado directamente participando activamente en las numerosas actividades de divulgación que en el Centro de Astrobiología tienen lugar a lo largo del año.

Actualmente se están escribiendo dos artículos científicos de la Mina de las Cruces, que se enviarán a revistas del Science Citation Index, en los próximos meses.