Didáctica de la Mina de Touro: Procesos de Recuperación de Suelos y Aguas hiperácidas de Minas de Sulfuros Metálicos mediante la Valorización Biogeoquímica de Residuos.

Felipe Macías García. Tratamientos Ecológicos del Noroeste, S.L. (TEN), Touro A Coruña. Gestor de los Sistemas de Gestión Medioambiental EOQ.

Felipe Macías Vázquez. Catedrático Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. Inst. Investigación Tecnológica (IIT) Universidad Santiago Compostela.

Carmen Nieto Olano. Doctora en Biología. Profesora Enseñanza Secundaria Instituto Enseñanza Secundaria Xelmirez I.

RESUMEN: La mina de Touro a 20 Km de Santiago Compostela es un yacimiento de sulfuros metálicos de 600 hectáreas, explotado durante 14 años (1974-1988) para la obtención de cobre, provocando una alteración ambiental crítica con cortas profundas, paredes verticales, escombreras de estériles y una extensa balsa de decantación de lodos. Los materiales a la intemperie, sin vegetación ni suelo, soportan oxidación de los sulfuros metálicos, generan aguas de drenaje hiperácidas y, contaminan ríos de la cuenca del Ulla. La restauración ambiental se realiza mediante la aplicación de suelos artificiales (Tecnosoles), obtenidos por

valorización biogeoquímica de residuos. En estas condiciones la mina ofrece excelentes recursos didácticos y demostrativos relativos a la severa alteración ambiental y procesos de recuperación sostenible fabricando “Tecnosoles a la carta”, adecuados a la solución de los problemas de las explotaciones mineras o para la recuperación de suelos contaminados.

SUMMARY: The mine of Touro is located 20 km NE of Santiago de Compostela. It is an ore deposit of metallic sulphides, with an area of 600 ha, that has been exploited for fourteen years (1974-1988) to extract copper. This activity lead to a profound degradation of the environment with deep cuts, vertical walls, sterile dumps, and a large mine tailings pond. The materials left on the surface, lacking vegetation and soil cover, undergoes a rapid oxidation of the sulphides generating a hyper-acidic mine drainage which contaminates the rivers of the Ulla basin. Environmental restoration is done by using artificial soils (Technosols), obtained through biogeochemical valorization of residues. Under these conditions, the mine offers excelent didactic and demonstration resources related to the severe environmental degradation and the prospects for a sustainable restoration using á la carte Technosols. The Technosols can be designed to solve the specific problems of mining exploitations or to meet the needs for the restoration of contaminanted soils.

Palabras clave - Key words: Sulfuros - Sulphides; Hiperacidez - Hyperacidity; Suelos sulfúricos - Sulphuric soils; Organimos Extremófilos - Extremophiles Organism; Aguas ácidas de mina - acid mine drainage; Tecnosoles - Technosols; Humedales reactivos - Reactive wetlands.

1. Introducción.

La mina de Touro, situada en el Monte de las Minas entre los ayuntamientos de O Pino y Touro (A Coruña), fue explotada por la empresa “Río Tinto, S. A.” entre

1974-1988, para la beneficiación de Cobre, a partir de Calcopirita en las cortas de **Bama, Brandelos, Arinteiro y Vieiro.** El yacimiento contiene mineralizaciones masivas de pirita, pirrotina y calcopirita, calculándose su cubicación inicial en más de 25 millones de toneladas, con una ley de cobre del 0,63% (IGME, 1982)

La explotación de sulfuros en Mina Touro para la obtención de concentrados de Cu, se realizó a cielo abierto mediante cortas de paredes verticales de 11 m. y plataformas horizontales de extracción, conformando un conjunto escalonado que alcanza profundidades de hasta 100 m. Los taludes de las *"cortas",* están formados por rocas escasamente alteradas, y están parcialmente rellenas de agua cuando son cerradas. El material estéril se apiló en *"escombreras"* conformadas por materiales heterométricos, que pueden alcanzar espesores superiores a los 100 m y más de 300 ha de ocupación. Las menas metálicas se trataron, previa molienda hasta un tamaño de 100 micras, mediante flotación diferencial de la Calcopirita. El material concentrado fue trasladado a Huelva donde se realizó la electrolisis para obtención del Cu puro. Los residuos de la flotación fueron enviados a *"balsas de lodos de flotación",* ocupando unas 80 ha, con calados de hasta 80 m. Como consecuencia de las labores de explotación han quedado abandonadas cortas, escombreras de estériles, instalaciones de trituración y flotación y la balsa de lodos colmatada. Todo ello abarca una superficie fuertemente heterogénea de unas 600 ha, con dos zonas de actuación, unidas por una carretera (Figura 1) , En cada una de ellas se exponen a la intemperie vastas superficies de escombreras y huecos con taludes verticales. Las cortas principales son; Bama (2 cortas abiertas), Vieiro y Arinteiro, en ambos casos cerradas y, rellenas con agua de lluvia y escorrentías. La corta de Vieiro tiene una profundidad superior a 40 m y gran cantidad de agua embalsada, cuyas partes

profundas tienen importantes variaciones de pH y Eh respecto a las aguas superficiales. La corta Arinteiro, alcanza una profundidad de 20 a 28 m.

Actualmente se aprovecha el material de escombrera para obtener áridos de superficie alterable, con oxihidróxidos, sulfatos y hidroxisulfatos de Fe. Las cortas de roca poco alterada se explota para la obtención de áridos de trituración de calidad con menor contenido de azufre. Recientemente también se aprovechan materiales esquistosos, de la Serie de Órdenes, para la elaboración de áridos de firmes de carretera. Las aguas embalsadas en cortas se utilizan en la limpieza de finos de trituración bombeándolas desde la corta de Vieiro hasta la planta y de ésta a la corta de Arinteiro, desde donde son devueltas a la primera, en un ciclo continuo.

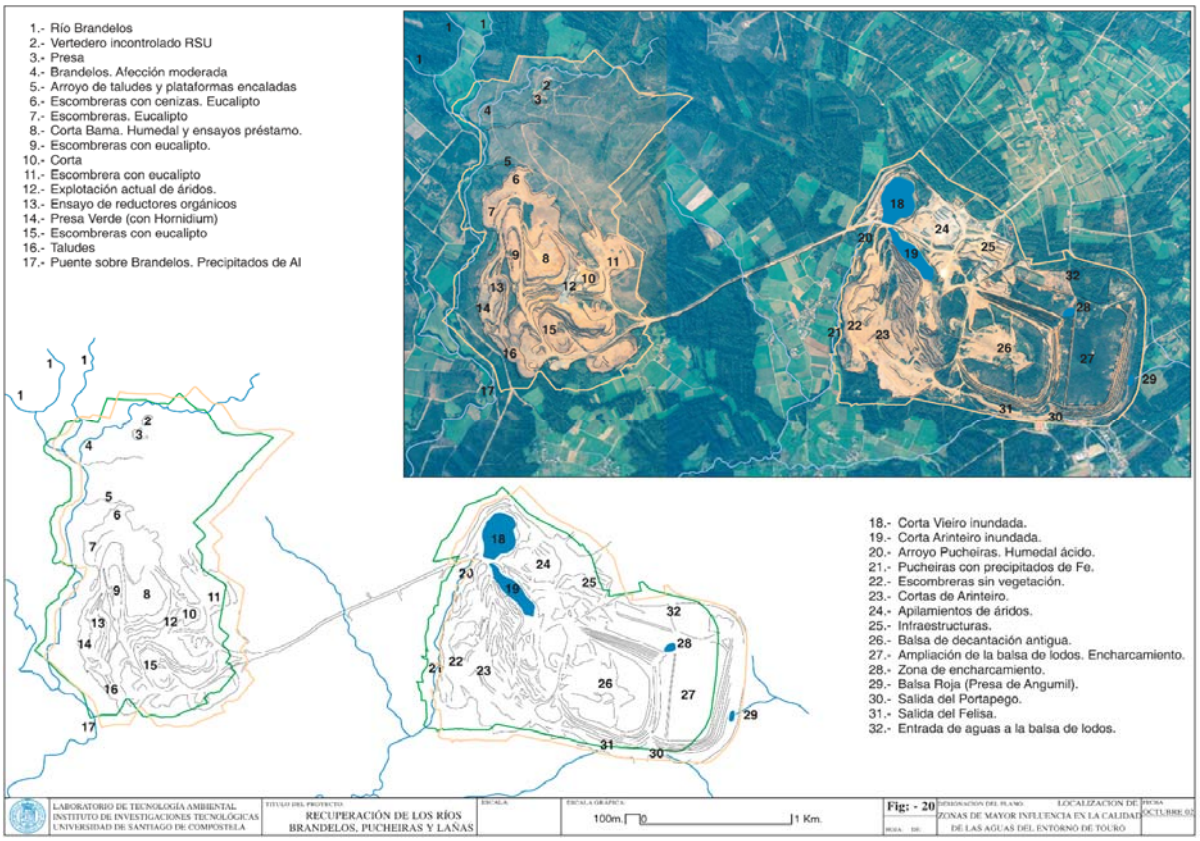

Figura 1.- Localización de las zonas de mayor influencia en la calidad de las aguas del entorno del área de estudio. Obtenido del Proyecto de recuperación de los ríos Brandelos, Pucheiras, Felisa, Portapego, Rego das Rozas y Lañas en el entorno de las minas de Touro.

2. Objeto.

El objetivo del presente trabajo es demostrar por qué la mina de Touro, un espacio degradado y contaminado por los impactos generados en la explotación de sulfuros metálicos, sirve para estudio y demostración, académica de procesos de explotación, contaminación y restauración de aguas y suelos con tecnosoles.

3. Características Geológicas del Yacimiento de Sulfuros Metálicos. Litología

La mina de Touro (Figura 1) se encuentra en una formación de anfibolitas precámbricas más o menos granatíferas mineralizadas con sulfuros metálicos, pirita y pirrotina, con niveles significativos de calcopirita y cantidades menores de blenda y otros sulfuros metálicos. Los minerales presentes en la cobertura superficial del yacimiento, son entre otros Ferrihidrita, Goethita, Jarosita y Schwermanita a los que acompañan en el estío diferentes sulfatos secundarios de Hierro, Magnesio, etc..

Su origen es similar al de la denominada “Faja Pirítica Andaluza”, es decir vulcano sedimentario en fondos de corteza oceánica, pero, a diferencia de ésta, el contenido de As, Cd, Hg, Se, Pb y Zn es mucho más bajo. El material anfibolítico corresponde a corteza oceánica habiéndose datado circones en rocas similares de Galicia de 900 y 1100 millones de años. Sobre estos materiales existe una formación de rocas esquistosas de la Serie de Órdenes, que se atribuyen a la transición Precámbrico Paleozoico.

Las mineralizaciones de Cu existentes en Galicia están asociadas al Complejo Metabásico de Santiago, constituido por anfibolitas precámbricas, que aparecen localmente en facies granulita o retrogradadas a esquistos verdes. Estas formaciones están diseminadas y fueron explotadas a cielo abierto (o en galería las más antiguas), cerca de de Santiago (Aríns) y de Touro, quedando recursos no

explotados en el entorno del “Monte de las Minas” y en otras áreas próximas como Arca y Prevendiños.

4. Procesos de Alteración de sulfuros: mecanismos bióticos y abióticos.

La oxidación de sulfuros expuestos en superficie tiene un elevado potencial acidificante de suelos y aguas. (Stumm & Morgan, 1981). La cinética de la reacción de oxidación está condicionada por diversos factores. Además, la oxidación de sulfuros, no sólo se produce por mecanismos inorgánicos sino que intervienen organismos vivos, que catalizan la reacción, favoreciendo un mecanismo entre los termodinámicamente posibles. El proceso se inicia con la acción como oxidante del O_2 atmosférico disuelto en H_2O:

❶ $$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \leftrightarrows 2Fe^{+2} + 4SO_4^{=} + 4H^+$$

Si el sistema se mantiene rico en O_2 aumenta la acidez producida por:

❷ $$Fe^{+3} + 3H_2O \leftrightarrows Fe(OH)_3 + 3H^+$$

Si disminuye el pH <4,0, la oxidación del Fe^{+2} formará Fe^{+3} como oxidante:

❸ $$Fe^{+2} \leftrightarrows Fe^{+3} + 1e^-$$

La presencia de Fe^{+3} (oxidante dominante) acelera el mecanismo oxidativo de sulfuros:

❹ $$FeS_2 + 14Fe^{+3} + 8H_2O \leftrightarrows 15Fe^{+2} + 2SO_4^{=} + 16H^+$$

Este mecanismo de oxidación rápidisimo y, puede seguir produciéndose, siempre que se mantengan las condiciones de Eh>500 mvol y pH<4,0. El sistema adquiere condiciones hiperácidas e hiperoxidantes que aceleran la hidrólisis de minerales, aumentando la disolución de metales como el Al y metales pesados (Fe, Mn, Cu, Zn,) y también del Si y de los iones Ca^{+2}, Mg^{+2}, Na^+, K^+, que serían liberados de otros minerales como contra iones de los $SO_4^{=}$ producidos (Alunita amorfa o Hidroxisulfatos en el caso del Al y Jarositas o Schwermanita en el del Fe).

Los mecanismos de oxidación de Fe^{+3} se aceleran por la acción de bacterias quimiolitotróficas acidófilas como *Thiobacillus ferrooxidans* (Figura 2), que cataliza la reacción de oxidación en condiciones hiperácidas e hiperoxidantes, mientras que otras actúan en condiciones no tan agresivas favoreciendo la eliminación de Fe^{+2} y la oxidación por O_2. En condiciones de hiperacidez, la cinética de la reacción es extraordinariamente rápida, incrementada por acción de *Thiobacillus*, lo que genera la concentración suficiente de Fe^{+3} para que, se autoperpetúe la oxidación de sulfuros. Se crea así, un sistema cíclico en el que el ión ferroso es oxidado catalíticamente La cinética es tan elevada que, el sistema de oxidación se convierte en una fuente de acidez incontrolada para los suelos y aguas que interactúen con él.

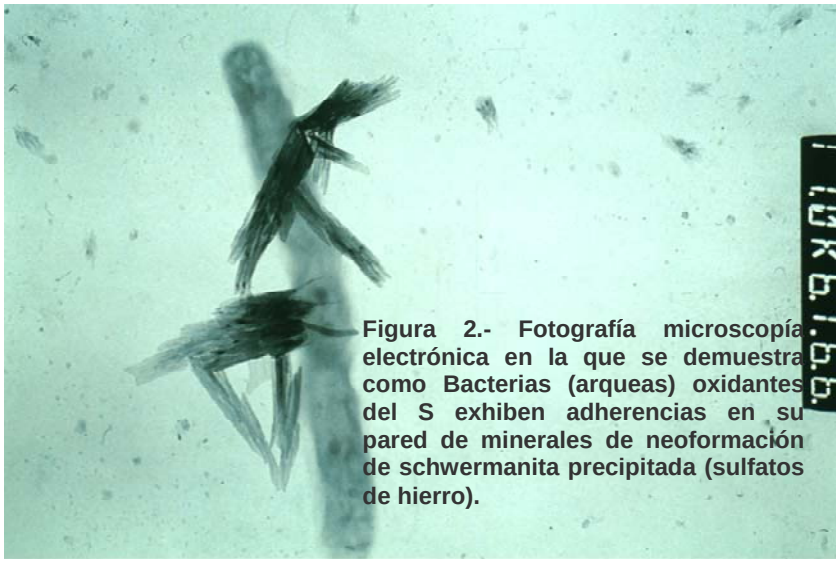

Figura 2.- Fotografía microscopía electrónica en la que se demuestra como Bacterias (arqueas) oxidantes del S exhiben adherencias en su pared de minerales de neoformación de schwermanita precipitada (sulfatos de hierro).

5. Formación de aguas hiperácidas de mina. Sistemas bióticos extremófilos. Formación de suelos de mina sulfúricos, hiperácidos e hiperoxidantes.

Todos los materiales rocas, escombros y lodos, que contienen sulfuros son sometidos a procesos de oxidación a la intemperie actuando como oxidantes el O_2 disuelto y, posteriormente, el Fe^{+3}, con el resultado final de formación de suelos sulfúricos (pH 2-3,) a partir de los cuales se forman aguas hiperácidas (pH<3,5), hiperoxidantes, con elevada conductividad eléctrica y altas concentraciones de $SO_4^{=}$,

Al, Fe, Mn y otros iones como Ca y Mg (Calvo de Anta et al., 1991; Pérez et al. 2001; Macías-García et al., 2009). En estas condiciones se desarrollan microorganismos extremófilos y algunas algas acidófilas Clorofíceas del género *Hornidium,* que a medida que cargan a sus paredes celulares con adherencias de metales "bif-band" (banded ironstone formations), precipitan junto con compuestos de Fe y colonias bacterianas formando costras ferruginosas características (Figura 3). La situación ambiental provoca el desarrollo de sistemas de biorremediación espontánea.

Figura 3.- Algas acidófilas del género *Hornidium* desarrolladas en la superficie de las aguas con buen grado de insolación. La elevada cantidad de metales disueltos se adhieren a las paredes celulares de sus tejidos filamentosos, provocando su necrosamiento. El fondo se encuentra recubierto por las costras ferruginosas formadas en aguas hiperácidas e hiperoxidantes.

Los extremófilos son bacterias y arqueobacterias muy poco conocidas. Más del 80% del ADN existente en los sistemas acuáticos no se sabe a qué organismos pertenecen. La paragénesis simple del yacimiento reduce la toxicidad existente en los suelos y aguas, a los efectos de la hiperacidez y de especies muy tóxicas como Al^{+3} ó $AlSO^{4+}$ (Álvarez, et al., 1993). Así, desparecieron todos los vertebrados e insectos acuáticos en las aguas del entorno (Brandelos, Portapego y Lañas, afluentes del río Ulla), reduciendo su actividad biótica a la presencia de extremófilos.

Los suelos espólicos de mina, cortas, escombreras y balsa de lodos tienen una elevada acidez pH<3, son hiperoxidantes y con alta conductividad eléctrica en la disolución del suelo. No hay horizontes con materia orgánica y la actividad biótica, al

igual que en las aguas, está restringida a los organismos extremófilos. La ausencia de C y N y, la baja disponibilidad de P y K junto a la toxicidad causada por la elevada actividad del Al y Mn, son las limitaciones substanciales de “suelos sulfúricos”, formados por alteración superficial de sulfuros, sin que exista la capacidad de neutralización de ácidos necesaria para impedirlo.

6. Recuperación de la mina mediante tecnosoles y humedales reactivos.

Recuperar la zona explotada (600 ha) sería extremadamente costosa. Por ello, se ha procedido a desarrollar un procedimiento novedoso, basado en anteriores experiencias (Gil, et al., 1990; Monterroso et al., 1998), (Saiz et al., 2008), (Macías y Calvo de Anta, 1998), etc., en el que se combinan: los Tecnosoles y los Humedales reactivos con Tecnosoles. Ambos, nacen considerando que los suelos son sistemas superficiales únicos con capacidad tampón y de protección de otros compartimentos biogeoquímicos. Así, la recuperación ecológica emerge con un suelo que neutralice efectos tóxicos, deficiencias nutritivas y de organización del sistema, permitiendo la actividad biológica de forma sostenible.

La valorización biogeoquímica de algunos residuos orgánicos e inorgánicos no peligrosos (Macías et al.) y la aplicación de la Edafología permite obtener suelos que cumplen con las funciones productivas y ambientales de los suelos naturales. Además, eliminan o reducen significativamente efectos tóxicos y limitantes, al tiempo que evolucionan hacia los suelos naturales siguiendo los procesos de edafogénesis propios del entorno climático. Se denominan Tecnosoles, pues cumplen con la exigencia de la WRB (2006) de contener más de un 30% de artefactos. Su uso plantea diferentes ventajas: Se parte de materiales desechados y baratos, cuyo destino sería producción de gases de efecto invernadero (CO_2, CH_4, NO_X), y pérdida del valor de los elementos nutritivos que contienen, como P, K, Mg, Ca, S, etc.

La elaboración de los Tecnosoles permite recuperar un porcentaje muy elevado del C y del N de los residuos (>80%), secuestrando gases de efecto invernadero en suelos (se han elaborado Tecnosoles con 10-14 t C/ha/cm). Del C acumulado hay una parte lábil, para satisfacer la demanda biótica, y otra, recalcitrante, que permite mantener la estabilidad estructural y el secuestro de C, al tiempo que se retiene agua útil y se incrementa la capacidad de cambio de cationes. Se valorizan los elementos encalantes y los nutrientes presentes en los residuos, lo que permite la corrección de los problemas de acidificación y toxicidad de los suelos y aguas y, como consecuencia, produce la recuperación de las comunidades bióticas de los sistemas acuáticos y terrestres.

Figura 4.- Abundancia de biodiversidad de plantas espontáneas que permiten la cría de perdiz roja, conejos, liebres,… además de incrementar la producción maderera y la velocidad de recuperación de los suelos de mina.

Con diferentes residuos, mediante formulaciones adecuadas basadas en la imitación de los componentes y propiedades de algunos suelos naturales (Macías y Camps, 2011), se elaboran suelos apropiados a la resolución, o a la mitigación, de cada tipo de contaminante o limitación ambiental. (Tecnosoles a la carta). Así, se recupera gran parte, de la mina Touro. En sistemas terrestres, degradados, contaminados y prácticamente abióticos (solo colonizados con extremófilos), hay Tecnosoles que permiten el desarrollo de una importante biodiversidad de flora que evoluciona en el tiempo favoreciendo la aparición de fauna espontánea.

Las aguas tratadas en humedales reactivos con Tecnosoles remontan su pH a la neutralidad sin adición de productos, gastos de electricidad o mantenimiento (Macías García et al., 2009), pierden las especies tóxicas y desarrollan una comunidad acuática con numerosos insectos (incluidos efémeras y larvas de libélulas), que alimentan a aves insectívoras, ranas y otros anfibios que, a su vez, soportan a una importante comunidad de palmípedas (patos real y cuchara, agachadizas), y depredadores como culebras de agua, víbora y aves rapaces.

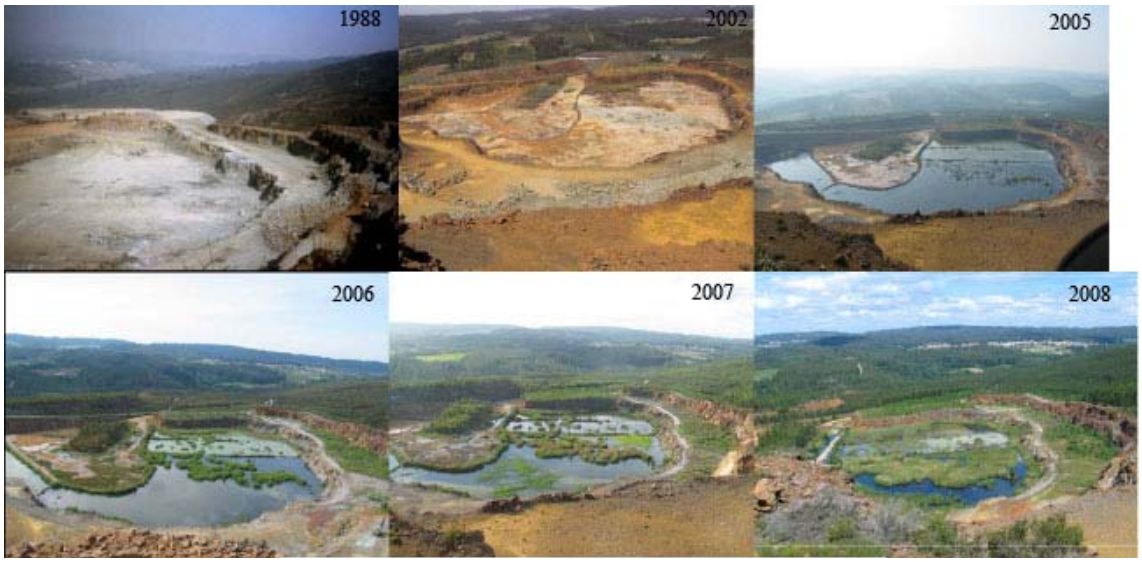

Figura 5.- Evolución de la corta de Bama donde se ha instalado un sistema de depuración de aguas ácidas de mina (AMD) con Tecnosoles reactivos y un humedal de condiciones subóxicas. Las aguas de mina entran a pH<3 y con altas concentraciones de Al, $SO_4^{=}$ y otros iones tóxicos y salen a pH>7, directamente utilizables como aguas de riego, cría de peces o potabilización.

7. Conclusión

La diversidad de Tecnosoles y usos ensayados (natural, forestal, agrícola, ganadero, industrial, experimental, recreativo,) hacen de la mina Touro un importante muestrario de experiencias de recuperación de suelos y ecosistemas, aplicable a otros muchos lugares y condiciones ambientales, sirviendo como espacio docente a diferentes niveles de educación (primaria, Secundaria y Bachillerato) e investigación en diversos campos científicos de las tres Universidades Gallegas.

8. Bibliografía:

Álvarez, E.; Pérez Otero, A.; Calvo de Anta, R. (1993). Aluminium speciation in surface waters and soil solution in areas of sulphide mineralization in Galicia (NW Spain). The Science of the Total Environment, 133, 17-37

Calvo de Anta, R., Pérez Otero, A.; Álvarez, E. (1991).- Efectos de las minas de Arinteiro (La Coruña) sobre la calidad de aguas super y subsuperficiales. Ecología, 5, 87-100.

Calvo de Anta, R.; Macías, F. 2009. Remediation of Soils contaminated with pyritic sludge from a mine spill in Aznalcóllar, Spain. In: Land Degradation and Rehabilitation. Dryland Ecosystems. (eds. A. Faz; A.R. Mermut, J. M. Arocena & R. Ortiz). Advances in Geoecology 40. CATENA VERLAG. 295-310.

Gil Bueno, A; Val, C; Macías, F; Monterroso, C. 1990. Restauración de la escombrera de la Mina de Puentes. Tecnoambiente, 1: 65-74.

Lucheta, A.R.; Rodrigues Lambais, M.; Otero, X.L.; Macías, F. 2012. Bacteria and Archaea diversity in the acid drainage sediments of the mine of Touro (Galicia, Spain). (in press.)

Macías, F.; Calvo de Anta, et al., 1998. Plan de recuperación de los suelos de la cuenca del río Guadiamar afectados por los vertidos mineros de la mina de Aznalcóllar. EGMASA-JUNTA DE ANDALUCIA.

Macías F.; Bao M.; Macías-García, F.; Bao, M.; Camps Arbestain, M. (2007) Valorización biogeoquímica de residuos por medio de la elaboración de Tecnosoles con diferentes aplicaciones ambientales. Aguas & Residuos 5:12–25

Macías, F., Camps Arbestain, M. 2009. Alternativas para el secuestro de Carbono en suelos y biomasa: Aprendiendo de la naturaleza, aprendiendo de los Suelos. En: Captura y Almacenamiento de CO2. Ed. E. Galán. Monografías de la Real Academia Sevillana de Ciencias, 50-81.

Macías, F.; Camps Arbestain, C. 2010. Soil carbon sequestration in a changing global environment. Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change. DOI 10.1007/s11027-010-9231-4.

Macías-García, F.; Camps Arbestain, M.; Macías, F. 2009. Utilización de Tecnosoles derivados de residuos en procesos de restauración de suelos de la mina Touro. En: Minería Sostenible. Cámara Oficial Mineira de Galicia. A Coruña. 651-661.

Macías-García, F.; Fontán, L.; Otero, X. L.; Pérez Llaguno, C.; Camps Arbestain, M.; Macías, F. 2009. Recuperación de aguas ácidas de la mina Touro mediante sistemas integrados de barreras reactivas con diferentes Tecnosoles y humedales. En: Minería Sostenible. Cámara Oficial Mineira de Galicia. A Coruña. 963-973.

Monterroso, C.; Macías, F.; Gil Bueno, A.; Val, C. 1998. Evaluation of the land reclamation project at the As Pontes Mine (NW Spain) in relation to the suitability of the soil for plant growth. Land Degradation & Development. 9, 441-451.

Pérez, A.; Calvo de Anta, R. 2001. Algunos ejemplos de suelos contaminados por la minería de sulfuros en la mina Touro. Libro de campo XXII Reunión Nacional de la SECS. Santiago. 54-67;

Saiz, J.L., Ceacero, C.J.; Macías, F.. 2008. Revegetación de suelos acidificados por minería metálica. Junta de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente. Sevilla. 198 pp

Stumm W & Morgan JJ, 1981. Aquatic Chemistry: an Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters, Wiley-Interscience, Toronto.

Urrutia, M.; García-Rodeja, E.; Macías, F. 1992. Sulfide oxidation in coal-mine dumps: Laboratory measurement of acidifying potential with H2O2 and its application to characterize spoil materials. Environmental Management, 16, nº1: 81-89.