

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

La materialización de la economía
circular aplicada en las
Restauraciones mineras

Caso éxito Mina de Touro



CONAMA 2024

LA MATERIALIZACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR APLICADA A RESTAURACIONES MINERAS

Autor Principal: David González Campos (Tratamientos Ecológicos del Noroeste)

Otros autores: Carmen Pintor y Noelia Castro (Tratamientos Ecológicos del Noroeste)

ÍNDICE

Resumen

1.- Antecedentes

2.- Justificación de necesidad de Tratamientos Ecológicos del Noroeste.

3.- Historia de la empresa.

4.- Modelo de Economía Circular e I+D+i.

5.- Productos innovadores fabricados en TEN

6.- Restauración Mina de Touro

7.- Conclusiones.

Bibliografía

RESUMEN

Caso éxito Restauración Mina de Touro

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, en los que no existía materia orgánica ni actividad biológica, es decir no contenían ni vegetación ni suelo, soportaban la oxidación de los sulfuros metálicos, generando aguas de drenaje hiperácidas con presencia de metales.

Tras el abandono de la explotación minera a lo largo de la década de los noventa la Universidad de Santiago de Compostela llevó a cabo diversos proyectos de investigación con el objetivo de desarrollar una tecnología que permitiese la regeneración de las aguas del entorno de la mina y la recuperación del ecosistema. Esta investigación se centró en la búsqueda de residuos valorizables que tuviesen propiedades reductoras para evitar la oxidación de los sulfuros metálicos y tamponizantes que permitiesen absorber sulfatos. En el curso de estas investigaciones se realizaron pruebas de aplicación de suelos artificiales (Tecnosoles), obtenidos por valorización biogeoquímica de diferentes residuos (cenizas, dregs de papeleras, lodos de depuradoras...).

En el año 2004 se funda Tratamientos Ecológicos del Noroeste S.L. (TEN) cuya actividad se centra en la valorización de residuos no peligrosos, empleando para ellos operaciones de compostaje que le permite obtener enmiendas orgánicas destinadas a producir fertilizantes 100% orgánicos y Tecnosoles destinados a la regeneración de la antigua mina de Touro.

Como consecuencia de la aplicación de tecnosoles tanto en cortas como en escombreras, así como la creación de humedales reactivos, se ha logrado recuperar la calidad del agua de los ríos del entorno elevando pH desde valores hiperácidos de 3-3,5 hasta 6,5-7,5 con ausencia de metales en disueltos así como la recuperación del ecosistema en una superficie que años atrás se encontraba altamente degradada. Los Tecnosoles han permitido la recuperación y eliminación de la casi totalidad de los efectos nocivos exteriores que causaba la antigua mina a las aguas de su entorno, la recuperación de las funciones ambientales y las productivas de los suelos (se han realizado diversas plantaciones forestales en un espacio que en su inicio no tenía una brizna de hierba y en el cual cualquier planta introducida moría en menos de una semana), el desarrollo de la fauna (se ha pasado de sólo organismos extremófilos a una cadena trófica compleja que incluye la posibilidad de cría y alimentación de insectos, aves, anfibios y mamíferos) y la modificación paisajística de la mayor parte de la superficie minera.

Mina de Riotinto

Como consecuencia del éxito alcanzado en la Mina de Touro, en la actualidad se está promoviendo un proyecto en la Mina de Riotinto (Huelva) que permitirá fabricar Tecnosoles destinados a la regeneración de un espacio minero que ocupa más de 2.000Ha y que ha sido explotado históricamente generando cortas y escombreras. Una de las principales características del proyecto consiste en que se llevará a cabo la restauración de las zonas ya cerradas al mismo tiempo que a mina continúa en fase de extracción.

1.- Antecedentes

En el año 1986 se publica la Directiva del Consejo 86/278/CEE, de 12 de junio, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de lodos de depuradora en agricultura establece los principios que deben presidir las normativas nacionales sobre dicho tema en la búsqueda de un equilibrio entre los distintos destinos de los lodos y, en particular, el de la aplicación en agricultura.

Galicia es una comunidad autónoma con unas características peculiares que hacen precisa la adaptación de la mencionada normativa de cara a un mejor aprovechamiento de los recursos agrícolas que los lodos suponen y a evitar el deterioro ambiental que la mala utilización de esos recursos podría implicar. Entre esas características destacan el predominio de los suelos con pH ácido y con unos contenidos en materia orgánica y fósforo en general altos. A esas circunstancias hay que añadir la existencia de una industria agroalimentaria y de productos de la pesca desarrollada, así como una acumulación de la población en las zonas costeras.

En el año 2003 el Consello Galego de Medioambiente aprueba el “Plan de Recuperación de los Rios Brandelos, Pucheiras, Felisa, Portapego, Rego das Rozas y Lañas en el entorno de las Minas de Touro” redactado por la Universidad de Santiago de Compostela. El espíritu de ese proyecto era recuperar la calidad de las aguas mediante la elaboración de suelos correctores valorizando residuos. Para ello era necesario una instalación capaz de fabricar los suelos empleados para restaurar la Mina.

En el año 2005 comienza a operar TEN. En el inicio la actividad se centró exclusivamente en la investigación con la USC para la creación de Tecnosoles adecuados para la restauración de la Mina. Se desarrollaron diversos Tecnosoles que fueron aplicados en distintas zonas de la Mina para lograr los objetivos marcados (elevar pH, tamponizar, captar metales...). Se estableció un protocolo de seguimiento y control de las aplicaciones monitorizando hasta 40 puntos del entorno de la Mina para comprobar la eficacia de los Tecnosoles en las aguas. En la actualidad se continúa restaurando zonas degradadas, y se controlan las aguas tanto interiores como del entorno de la Mina. Desde el año 2010 TEN amplía la valorización de residuos con la fabricación de fertilizantes orgánicos. Actualmente tiene registrados 2 fertilizantes orgánicos. Esto permite VALORIZAR residuos de las EDAR de las principales ciudades gallegas, dando servicio a más de 1,5 Mill de habitantes, así como a las principales industrias gallegas.

En 2012, la Xunta de Galicia publica el DECRETO 125/2012, de 10 de mayo, por el que se regula la utilización de lodos de depuradora en el ámbito del sector agrario en la Comunidad Autónoma de Galicia. Esta orden establecía la prohibición de la aplicación agrícola directa y obliga a realizar un tratamiento previo de valorización, así como establecer los correspondientes controles a las parcelas donde se vayan a aplicar suelos fabricados a partir de residuos valorizables.

2.- Justificación de necesidad de Tratamientos Ecológicos del Noroeste.

A continuación se resumen los dos principales problemas a los que se dieron solución con la Planta de TEN en Touro:

a) Salud Pública.

Los residuos en general, y en particular los lodos EDAR contienen elementos nocivos para la salud, por lo que es absolutamente necesaria su higienización previa a la aplicación dado el elevado riesgo que representan para la Salud Pública. Algunos de los patógenos que contienen los lodos EDAR son los siguientes:

- ✓ Virus
- ✓ Bacterias
- ✓ Helmintos
- ✓ Metales pesados

Mediante el proceso de valorización al que se someten los residuos en la Planta se garantiza la eliminación de todos estos patógenos y que los productos fabricados cumplan exhaustivamente los requisitos necesarios para su uso final, ya sean fertilizantes o suelos para restauración de espacios degradados como consecuencia de la actividad Minera.

b) Cumplimiento de la Legislación Medioambiental y Minera.

Con la implantación de esta instalación se cubre la necesidad de dotar a la comunidad autónoma gallega de infraestructuras para el correcto tratamiento de residuos orgánicos, así como se da capacidad de producción de materiales que permiten la restauración de espacios degradados y mineros.

Las políticas de la UE en materia de residuos y Economía Circular van encaminadas a promover la valorización de los residuos frente a la eliminación.

La actual legislación minera obliga a restaurar los espacios degradados como consecuencia de la actividad extractiva, una vez se finaliza el periodo de explotación.

3.- Historia de la empresa.

Tratamientos Ecológicos del Noroeste S.L. inicia su actividad en 2005 centrada en la valorización de residuos no peligrosos, empleando para ellos operaciones de compostaje que le permite obtener enmiendas orgánicas y tecnosoles (suelos artificiales derivados de residuos) destinados a la regeneración de la antigua mina de Touro (A Coruña). Cuenta con Autorización Ambiental Integrada.



Vista General de las Instalaciones. (Fuente: TEN)

La planta cuenta con una superficie de 60.000m² de los cual 10.000m² se encuentran a cubierto. Toda la superficie se encuentra impermeabilizada mediante MBC, lo que garantiza la correcta gestión tanto de residuos como de aguas de la instalación.

A lo largo de los años de actividad TEN ha invertido más de 8M€ en infraestructuras, maquinaria y proyectos I+D, lo que le permite innovar constantemente, así como aplicar las Mejores Técnicas Disponibles para el desarrollo de la actividad.

En el desarrollo de su actividad innovadora ha contado con la colaboración de casi todos los organismos gallegos y estatales de fomento del I+D, por ejemplo, IGAPE, CMATI, AGADER, GAIN, Life UE...

La actividad innovadora de TEN fue la base de la Normativa gallega que regula la fabricación de Tecnosoles a partir de residuos, que se publicó en 2008 mediante la ITR01/08. Esta norma es a su vez la base de otras en el resto del estado español.

Durante los 20 años de actividad TEN se ha caracterizado por mantener una gran estabilidad en el empleo de calidad generado, creciendo años tras año. Actualmente cuenta con un equipo entre directos e indirectos de aprox. 60 personas.

4.- Modelo de Economía Circular e I+D+i.

La actividad de Tratamientos Ecológicos del Noroeste se basa en un claro ejemplo de Modelo de negocio de **Economía Circular**, pues emplea residuos como los recursos necesarios para la fabricación de Tecnosoles que permiten la restauración de espacios degradados.

La Planta dotó a la sociedad gallega de capacidad para el correcto tratamiento de sus residuos orgánicos permitiendo:

- ✓ Valorizar los residuos orgánicos mediante un proceso Biológico (natural).
- ✓ Fabricar de suelos artificiales que son empleados en la restauración de espacios degradados.
- ✓ Cumplir la legislación Europea, Estatal y Autonómica en materia de gestión de residuos y Economía Circular, y legislación minera.

Además TEN participa activamente en Proyectos de I+D+i. A modo de ejemplo, desde 2018-2022 TEN participó dentro del consorcio Galaico-Luso para el proyecto; LIFE REFORESTLIFE17 ENV/ES/000248 (Erosion Prevention and Flora Restoration of burnt FOREST areas through innovative fungal-technosolsolution). Se trata de un proyecto de investigación con apoyo europeo que pretende luchar contra la erosión en terrenos incendiados en sus primeras etapas y aumentar la velocidad de revegetación a través de la aplicación de un mulching y la instalación de mangas biodegradables de micotecnosoles. Es decir, se investiga en el diseño y producción de un suelo artificial elaborado con residuos compostados y posteriormente micorrizado con una selección de hongos para lograr la máxima fijación del suelo sobre el que se aplica.

5.- Productos innovadores fabricados en TEN

5.1 Tecnosoles

Los Tecnosoles son suelos que tienen como particularidad que su materia prima son residuos.

Los objetivos básicos de la obtención del Tecnosol son:

- Valorizar residuos a través de su integración en los ciclos biogeoquímicos lo más rápida e integralmente posible y con garantía sanitaria, tomando como modelo los procesos edáficos existentes en condiciones naturales.
- Resolver problemas ambientales al tiempo que se realiza una gestión más eficaz de los residuos minimizando la liberación de C y N de los residuos a la atmósfera.

Los objetivos prácticos de los tecnosuelos son:

- ✓ Valorizar residuos seleccionados estabilizando la máxima cantidad de C y N con modelos similares a los de los suelos naturales con garantía sanitaria.
- ✓ Luchar contra el efecto invernadero por medio de la reducción de la formación de CO₂.

- ✓ Recuperar suelos degradados o contaminados. Especialmente los de áreas afectadas por procesos mineros, urbanizaciones, áreas erosionadas, etc.
- ✓ Incrementar la fertilidad de los suelos.
- ✓ Constituir un nuevo medio de vida con elevada capacidad de producción de biomasa.
- ✓ Cumplir adecuadamente las funciones ambientales y productivas de los suelos.
- ✓ Gestionar residuos con una mayor eficacia ambiental, minimizando las pérdidas de gases de efecto invernadero y nutrientes, reincorporando los elementos rápidamente y con garantía sanitaria a los ciclos biogeoquímicos y favoreciendo la producción de biomasa y la estabilización de la materia orgánica en formas similares a las de los suelos de mayor capacidad de secuestro de Carbono.

5.2 Fertilizantes orgánicos vs Fertilizantes químicos.

Como consecuencia de esta fuerte actividad innovadora TEN cuenta con dos enmiendas orgánicas-compost inscritas en el registro estatal de productos fertilizantes del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: COMPOSTEN2 y COMPOSTEN PLUS.

Diversos estudios agronómicos y ambientales indican que los suelos gallegos están perdiendo su riqueza de materia orgánica debido al abandono de las actividades agrícolas tradicional (vinculada a actividades ganaderas). Por otra banda las tierras que de forma continuada están tratadas con fertilizantes químicos experimentan a lo largo de los años una pérdida de su riqueza natural de materia orgánica y esto lastra su productividad en el futuro. Con el uso de compost de calidad se contribuye a:

- Mejorar la estructura y textura de nuestros suelos y su resistencia a la erosión.
- Mengua los efectos negativos sobre los suelos de ciertos fitosanitarios.
- Mejora la retención de humedad en el suelo. Es decir, permite que los cultivos resistan mejor las temporadas de sequía.
- El compost es un abono orgánico natural que actúa como sumidero de carbono en el suelo, contribuyendo a solucionar la problemática del cambio climático.
- “Hace suelo”, es decir, mejora la calidad del suelo sobre el que se aplica evitando el riesgo de sobrefertilización.

6.- Restauración Mina de Touro

Para realizar las tareas de recuperación en las minas de Touro fueron desarrollados diferentes procedimientos que permitían establecer un orden de alterabilidad y generación de acidez. Procedimientos que, posteriormente, han sido aplicados a las obras de Ingeniería Civil, y, muy especialmente, en el caso de los materiales ampelíticos que debían ser extraídos de túneles del tren de alta velocidad y que han sido llevados a vertederos controlados.

En casos de materiales con altos niveles de sulfuros deben utilizarse procedimientos utilizados para predecir el comportamiento de escombreras de minas con sulfuros metálicos basados en la cinética de los procesos de oxidación forzada. El tiempo que tarda un material en alcanzar el estado hiperácido (oxidación con Fe^{+3}) es clave.

En la mina de Touro las características de los materiales con un relativamente alto nivel de S pirítico, elevados contenidos de pirrotina, fuerte fracturación de los materiales y presencia de oxidantes en los materiales movilizados (O_2 y nitratos procedentes de los explosivos) provocan una fuerte y rápida acidificación.

En general, en cualquier suelo, el mayor problema lo constituye la elevada concentración de formas de S reducido, no sólo en las zonas mineralizadas, sino prácticamente en todos los materiales anfíbolíticos e incluso, con bastante frecuencia, en los planos de esquistosidad de esquistos y paragneises. De los datos de más de 1000 muestras analizadas en diferentes suelos, el contenido de S pirítico oscilaba entre un valor mínimo de 0,00 y un máximo de 20,58% con un valor más frecuente de 0,5% y un valor medio en torno a 0.8%.

Los valores inferiores al 0,1% representaban menos del 6% del total de muestras, por lo que se puede concluir, con gran seguridad que los únicos materiales que no tienen un potencial acidificante eran prácticamente los suelos superficiales y algunas saprolitas fuertemente oxidadas de naturaleza caolinítica. El resto de los materiales siempre producirá acidez y, en prácticamente en todos los casos, si no se realizan actividades preventivas de mitigación de los procesos oxidativos y de tamponización llegarán a condiciones hiperácidas.

Esto implica que la casi totalidad de los materiales era potencial productor de sistemas con aguas hiperácidas y que menos de un 10% y, solo si es separado en origen del resto de los materiales ricos en S reducido, podría considerarse que el riesgo de hiperacidificación es mínimo.

A idénticas conclusiones, sólo que todavía con mayor riesgo de acidificación se llega analizando el contenido de azufre y la cinética de oxidación forzada de materiales recogidos en escombreras y cortas de la mina Touro. El porcentaje de S pirítico para gravas de diferentes tamaños recogidos por el LTA-USC en diferentes zonas de la mina de Touro osciló entre 0,08 y 33,89%, lo que significa que aun separando las dos muestras de contenidos superiores al 30%, que sin duda aparecen en los estériles del yacimiento, el porcentaje de S pirítico es superior al 1,3%. Es decir, más de 10 veces superior al valor a partir del que se ha observado la presencia de una rápida acidificación por oxidación de sulfuros.

Con la experiencia existente, basada en las minas de Touro y As Pontes y los materiales extraídos de los túneles del tren de alta velocidad en la zona de A Gudiña (también regenerados con Tecnosoles fabricados en TEN), se concluye que todos los materiales que contienen más de un

0,1% de S pirítico tienen que ser tratados con capas de Tecnosoles reductores y tamponizantes.

Alternativas de gestión de la acidificación por oxidación de sulfuros.

La lucha contra los efectos negativos de los sulfuros se basa en dos procedimientos: O bien se recuperan las condiciones de bajo potencial redox (condiciones subóxicas o anóxicas) en las que los sulfuros son estables, o bien se incrementa la capacidad de neutralización de ácidos de los materiales acompañantes, de modo que la acidez liberada sea rápidamente neutralizada y se mantenga el pH elevado.

Tal como se ha visto la oxidación de sulfuros comienza siempre por la acción del O₂ disuelto en agua, por lo que la eliminación del oxígeno y la reducción de la velocidad de difusión del mismo son factores positivos. Acciones como encharcamiento, manteniendo el agua parada, incremento de la presencia de reductores que consuman el oxígeno, dificultades para su renovación por cubrición rápida, etc., son positivos en esta fase.

La reacción con el oxígeno es lenta, pero aumenta medida que desciende el pH. Si éste desciende de 4.0 se forma en el medio Fe⁺³ y ya no hace falta el O₂, razón por la cual la cubrición con materiales ya no es tan efectiva cuando se han alcanzado condiciones de oxidación por Fe⁺³. De ahí la importancia de controlar lo más posible y lo más rápidamente posible el pH del sistema oxidativo. Si éste se mantiene a valores de pH superiores a 4.0 no hay Fe⁺³, y si es superior a 5.5-6.0, la velocidad de la reacción es muy pequeña y puede ser controlada con relativa facilidad por los materiales acompañantes, especialmente si hay reductores en el sistema capaces de suministrar electrones a los agentes oxidantes. Esto nos lleva a la necesidad de adicionar sustancias enalantes, con elevada capacidad tampón, cuando se espera un proceso oxidativo de sulfuros y a la necesidad de incrementar la relación dadores/aceptores de electrones en los sistemas de exposición de sulfuros a la intemperie. Siendo la biomasa y la necromasa los principales factores favorables, hay que tener en cuenta que son totalmente inexistentes o muy poco eficientes en las minas en explotación, donde las actividades mineras llevan consigo la completa eliminación de la cobertura vegetal, del suelo rico en humus, así como los restos de las actividades biótica.

Por tanto la alternativa elegida para la restauración de la Mina de TOURO se basa en la adición de Tecnosoles reductores, que minimizan la oxidación, antiacidificantes que neutralizan la acidez producida, tamponizantes que controlan las variaciones de pH y adsorbentes de sulfatos.

Además, estos Tecnosoles pueden tener otros efectos ambientales, tales como incrementar la capacidad de retención de agua, favorecer la actividad biológica y la biodiversidad, incrementar los nutrientes biodisponibles, etc., todo lo cual favorece enormemente el proceso de recuperación, acortando plazos y disminuyendo costes económicos y ambientales.

La alternativa sería la aplicación de calizas para la corrección de los problemas expuestos, pero se antoja imposible el cálculo de las toneladas necesarias para ello pues, como aproximación, puede considerarse que debe tenerse en el sistema al menos de 3 a 4 veces (en peso) la cantidad de caliza activa que de azufre pirítico.

Por el contrario, si se realiza con Tecnosoles adecuados las cifras de material aportado pueden reducirse considerablemente por las importantes diferencias que produce el Tecnoisol respecto a la caliza, que se sintetizan en las siguientes:

- ✓ Mayor capacidad de neutralización de ácidos (en torno a 1,5 veces la de la caliza).
- ✓ Mayor sostenibilidad y eficiencia tamponizante (menor solubilidad y no pasivado).
- ✓ Capacidad reductora en sus componentes dadores de electrones. Esto reduce el Eh, lo que trae como consecuencia que el mecanismo oxidativo de los sulfuros sea mucho más lento y con menor producción de acidez.
- ✓ Capacidad de fijación de sulfatos. Tecnosoles con capacidad de fijación de sulfatos evitan pérdidas de cationes básicos (Ca, Mg, K, Na) que actúan como neutralizantes.

Por tanto el método empleado para la restauración de la Mina de Touro consiste en la aplicación y extendido de capas de diversos Tecnosoles en las diferentes zonas afectadas con lo que se lograr corregir de manera paulatina los efectos de la acidificación del suelo y mantenerlos en el tiempo.



Detalle de foto área de la Mina de Touro en 1998 y en 2023 (Fuente: TEN)



Detalle de foto humedal en la Mina de Touro en 1998 y en 2019 (Fuente: TEN)

7.- Conclusiones.

Como se ha expuesto la actividad de Tratamientos Ecológicos del Noroeste se basa en un Modelo de negocio de **Economía Circular**, pues emplea los residuos generados por mas de 1,5 mil de gallegos como los recursos necesarios para la fabricación de Tecnosoles que permiten la restauración de espacios degradados y Fertilizantes orgánicos. Con ello se logra, además, el cumplimiento de la legislación Europea, Estatal y Autonómica en materia de gestión de residuos y Economía Circular, y la creación de empleo cualificado estable en una zona rural. Del trabajo realizado estos años se puede destacar estas conclusiones:

- 1.- El proceso de Recuperación de los Rios del entorno de la Mina arroja unas evidentes mejoras en cuanto a pH y contenido en metales de las aguas.
- 2.- La mejora de la biodiversidad de la zona es evidente, habiéndose logrado tanto la revegetación de la zona afectada como un entorno biodiversidad rico en fauna autóctona.
3. Resultado de las investigaciones de la USC se ha desarrollado un método de valorización de residuos eficaz que evita la eliminación en vertedero o gestión en otras CCAA.
- 4.- La experiencia de Touro ha servido para regular la normativa en autonómica en materia de valorización de residuos orgánicos.
- 5.- El éxito de Touro ha conllevado nuevos proyectos de restauración de espacios degradados como las escombreras de ADIF de la linea de alta velocidad Madrid- Galicia, la Mina de Saelices el Chico en Ciudad Real o el nuevo proyecto de restauración de la historica Mina de Riotinto en Huelva.

TEN, y su experiencia en la Mina de Touro ha permitido valorizar residuos de las depuradoras de las principales ciudades gallegas, regenerar un espacio degradado devolviéndole la biodeversidad y mejorar la calidad de las aguas de los rios del entorno de la Mina, enclavados en la Cuenca del Río ULLA.

BIBLIOGRAFIA

Antelo, J. M. et al., 1987. Parámetros físicoquímicos de las aguas de las cuencas de los ríos Anllons, Xallas, Tambre y Ulla. Memoria Diputación Provincial de La Coruña.

Bornstein, J.; Hedstrom, W.E.; Scott, T.R. 1980. Oxygen diffusion rate relationships under three soil conditions. LSA Exp. Sta. Tech.Bull., 98. 12 pp. Univ. Maine.

Bureau of Mines. 1988. Mine Drainage and Surface Mine Reclamation. United States. Department of the Interior.

Macías García, F. 2009. Utilización de Tecnosoles derivados de residuos en procesos de restauración de suelos de la mina Touro. Congreso de Minería Sostenible. Santiago de Compostela.

Macías, F. 2014.- Los Tecnosoles. Premio de Minería Sostenible CONFEDEM-IFEMA.

Martinez, J. C. 2017. Gestión ambiental significativa en obra civil de construcción de túneles: Tratamiento de aguas industriales y gestión de materiales piríticos procedentes de la excavación. Tesis doctoral. Universidad de Santiago

Nordstrom, D.K. 1982. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. En: Acid sulphate weathering. Soil Science Society of America. Kittrick, J.A.; Fanning, D.S. & Hossner, L.R. (eds.), Madison, WI, 37-56.

Nordstrom, D. K.; Alpers, Ch. N. 1999. Negative pH, efflorescent mineralogy, and consequences for environmental restoration at the Iron Mountain Superfund site, California. Proc. Natl. Acad. Sci., 96, 3455-3462.

Stumm, W.; Morgan, J. J. 1981. Aquatic chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. Wiley-Interscience. London.