

EL USO DE TECNOSOLES EN LA RESTAURACIÓN DE LAS ANTIGUAS MINAS DE URANIO DE Saelices el Chico (SALAMANCA)



IGNACIO J. VECILLAS FERNÁNDEZ
Director Centro Saelices el Chico
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS, S.A., S.M.E.



ROSARIO ARÉVALO SÁNCHEZ
Directora Corporativa
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS, S.A., S.M.E.



JOSÉ LUIS GIRÓN VÁZQUEZ
Responsable Proyectos Medioambientales y Energías Renovables. Dirección Corporativa
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS, S.A., S.M.E.



IGNACIO HERNÁNDEZ GONZÁLEZ
Jefe Tratamiento de Aguas y Mantenimiento.
Centro de Saelices el Chico.
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS, S.A., S.M.E.



PEDRO V. RODRÍGUEZ MOYANO
Técnico Proyectos Medioambientales y Energías Renovables. Dirección Corporativa
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS, S.A., S.M.E.

Una de las técnicas que más se está poniendo en valor actualmente en todo proceso de restauración ecológica lo constituye la aplicación de suelos artificiales denominados tecnosoles, que propugna conceder la importancia necesaria a los suelos en estas actividades de remediación, pues supone la interfaz fundamental de los sistemas litológico, atmosférico, hídrico y biótico, que regula los procesos biogeoquímicos y, con ello, protege a los otros sistemas más sensibles y con mucha menor capacidad de amortiguación. Además, realiza esta función al mismo tiempo que fomenta el crecimiento vegetativo, y constituye un medio de vida y reserva genética que también actúa como un sumidero de carbono y de recuperación de la biodiversidad.

Desde 2014, ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS, S.A. S.M.E., viene estudiando y desarrollando proyectos de investigación sobre la aplicación de tecnosoles en sus trabajos de restauración de las antiguas explotaciones mineras de Saelices el Chico (Salamanca). En este sentido cabe destacar la puesta en marcha del proyecto I+D “TEKURA”, que contempla la fabricación in situ de estos compuestos bioactivos y su aplicación en un área de 52 ha, con el objetivo de evitar la generación de aguas hiperácidas mediante reacciones físico-químicas y aprovechar su efecto fertilizante para generar una cubierta de vegetación que, añadido a la capacidad de retención de agua de los propios tecnosoles, ha favorecido un incremento efectivo de la evapotranspiración, lo que se traduce en la disminución efectiva de las aguas de escorrentía recogidas para tratamiento.

HISTORIA DEL EMPLAZAMIENTO MINERO DE Saelices el Chico (SALAMANCA)

El yacimiento de minerales de uranio conocido como MINA FE, localizado en el término municipal de Saelices el Chico (Salamanca) constituye el yacimiento de uranio más impor-

tante de la península ibérica, en cuanto a reservas, leyes del mineral y producción de concentrados uraníferos. Descubierta en 1957, en las campañas iniciáticas de exploración llevadas a cabo por la Junta de Energía Nuclear (JEN), fue explotado en el periodo 1970-2000 para la extracción de mineral de uranio y la fabricación de concentrados de U_3O_8 (un total de 5.750 t en toda su historia), a través de dos plantas de beneficio denominadas Planta Elefante y Planta Quercus (Figura 1).

En el año 2000, debido al constante descenso de precio del concentrado de uranio en los mercados internacionales, la explotación se vio abocada a su cierre definitivo. El programa

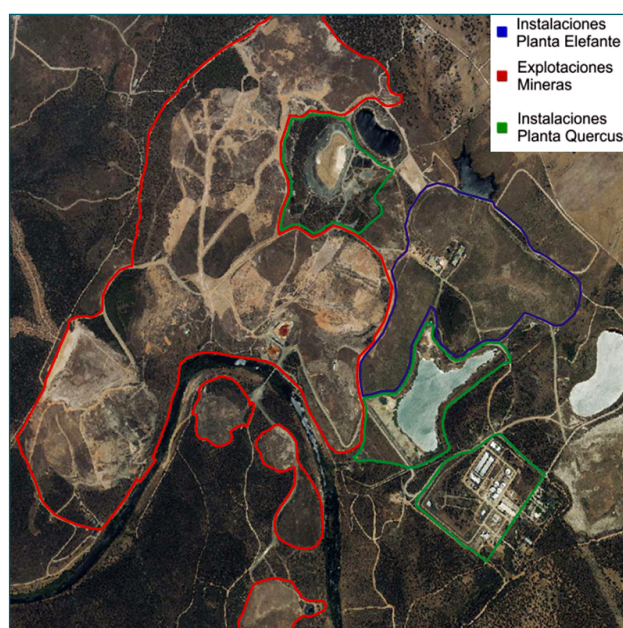


Figura 1. Instalaciones existentes en el emplazamiento minero de Saelices el Chico (ortofoto).

de clausura diseñado para el emplazamiento minero se dividió en 3 proyectos independientes:

- Desmantelamiento de Planta Elefante y estructuras asociadas.
- Restauración de las explotaciones mineras.
- Desmantelamiento de Planta Quercus y estructuras asociadas.

El proyecto de desmantelamiento de la Planta Elefante se ejecutó entre enero de 2001 y junio de 2004 y comprendió el desmantelamiento de las instalaciones industriales de proceso de la planta y la reconfiguración in situ de las eras de minerales agotados y diques de lodos.

Los materiales residuales procedentes del desmontaje y demolición de la instalación fueron dispuestos en un recinto de confinamiento próximo. Por lo que respecta a las antiguas eras de lixiviación estática (7 Mt de minerales agotados, apilados en forma troncopiramidal, con taludes próximos al 75 %) fueron remodeladas mediante su extendido y perfilado de taludes, logrando un nuevo relieve más suave, integrado en el paisaje geomorfológico circundante.

Tanto el recinto de confinamiento como los tres diques de lodos de proceso de la planta quedaron situados bajo las eras remodeladas. Posteriormente, todo el conjunto se cubrió con una multicapa de protección radiológica y medioambiental de 2,3 m de espesor, asegurando así el aislamiento y confinamiento del mismo.

El proyecto de restauración de las explotaciones mineras se inició en julio de 2004 y finalizó en mayo de 2008, y consistió en restituir geomorfológicamente el espacio natural afectado por las labores mineras, su recuperación hidráulica y la revegetación e integración paisajística de todo el conjunto en el entorno, así como la gestión de las aguas. La obra supuso un gigantesco movimiento de tierras (más de 20 Mm³ en un área de unas 230 ha) hasta conseguir el relleno de todos los huecos de explotación, y el acondicionamiento y taluzado de las escombreras remanentes.

Al igual que en el caso anterior, sobre la superficie restaurada de los huecos y las escombreras reconfiguradas se dispuso una multicapa de protección radiológica y medioambiental, si bien el espesor fue menor (casi 1 m en total) ante la diferente actividad radiológica de los materiales a cubrir. Para la restauración hidráulica del entorno se reconstruyeron las primitivas vaguadas naturales, protegiendo sus fondos con material de escollera, y se construyeron nuevas canalizaciones para mejorar la circulación y drenaje de las aguas de escorrentía.

La revegetación se efectuó sobre una superficie total de 250 ha mediante enmiendas orgánicas y minerales para acondicionar el escaso suelo típico del paraje adehesado del entorno, plantándose especies autóctonas herbáceas y arbustivas, y arbóreas (encinas y pinos, sólo en las zonas sin capas de protección).

Respecto a la situación actual de la Planta Quercus, esta planta se encuentra en cese definitivo de explotación desde julio de 2003. En 2005 se presentó una solicitud inicial de autorización de desmantelamiento, que quedó en suspenso durante unos años debido a la subida de precios del concentrado de uranio en los mercados internacionales que avaló la realización de un estudio de viabilidad de un posible reinicio de la explotación.

En 2015, con la vuelta a la normalidad de los precios del uranio, se presentó una revisión de la solicitud, atendiendo a los significativos cambios de licenciamiento que la entrada en vigor del R.D. 102/2014 provocó sobre el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas.

No obstante, el proceso de desmantelamiento de la planta está fuertemente condicionado por los drenajes ácidos existentes en mina, ya que obliga a mantener operativa la mayor parte de las infraestructuras de recogida, almacenamiento y tratamiento de aguas, hasta que su calidad permita la derivación directa a cauces públicos. Ello hace que sea necesario abordarlo por fases.

Durante la primera fase se concibe acometer el desmantelamiento de las instalaciones industriales del proceso mineralúrgico, y de la era de lixiviación estática (minerales agotados y tortas procedentes de la neutralización de efluentes). Se construirá un recinto de confinamiento colindante a la era de lixiviación en el que se depositarán los residuos procedentes del desmantelamiento de las instalaciones de proceso y que quedará cubierto por el extendido de la era y, posteriormente, por la correspondiente multicapa de protección. Aún está en tramitación la correspondiente Autorización de Desmantelamiento en su Fase I.

Permanecerán sin desmantelar, y plenamente operativos hasta una siguiente fase, el dique de estériles de proceso (*tailings*), la otra planta de tratamiento de aguas y las balsas de almacenamiento de aguas de mayor capacidad, necesarios para la eliminación de aguas ácidas, vía vertido a cauces públicos.

Se están llevando a cabo programas de vigilancia y control de las aguas subterráneas y de estabilidad de las estructuras remanentes para el periodo de cumplimiento de la restauración realizada. Dichos programas ponen de manifiesto que se han alcanzado las condiciones radiológicas y medioambientales fijadas para el desmantelamiento y la restauración efectuados, con excepción de la calidad de las aguas, que se ven afectadas por la presencia de drenajes ácidos de mina.

EL PROBLEMA DE LOS DRENAJES ÁCIDOS DE MINA

La existencia de drenajes ácidos en mina en el emplazamiento se produce a causa de la oxidación atmosférica de la piritita contenida en las pizarras encajantes del yacimiento, expuestas en los frentes de explotación y movilizadas en las escombreras, y que en presencia de agua, provoca la lixiviación de los metales contenidos en las mismas (Fe, Mn y U, entre otros metales pesados). Se trata de un proceso físico-químico ampliamente estudiado y muy común en casi todas las minas metálicas y de carbón del mundo.

En el caso de Saelices, se trata de aguas hiperácidas (pH < 3,5), hiperoxidantes (potencial redox Eh > 600 mV), hiperconductoras (Conductividad > 5.000 µS/cm), con contenidos elevados de sulfatos (2.500-13.000 mg/l) y de metales lixiviados, en especial, Al³⁺, Mn²⁺, Fe²⁺, Fe³⁺, y en menor medida U, Ni y Zn.

A causa de este proceso es preciso recoger y enviar a tratamiento por métodos activos un promedio de 500.000 m³/año de aguas contaminadas que se producen en el emplazamiento,

mediante proceso químico de neutralización y descontaminación en dos plantas de acondicionamiento de efluentes, generándose unos lodos que hay que gestionar in situ como residuos con contenidos bajos de isótopos radiactivos de origen natural, de muy baja actividad y vida larga.

Con objeto de atajar al máximo el problema ambiental, y no continuar de modo indefinido con este tipo de tratamiento, con el consiguiente coste económico, a partir del año 2012 se comenzaron a buscar soluciones basadas en métodos pasivos, que fueran autosostenibles en el tiempo y que actuaran directamente sobre la causas.

Como primera medida, se desarrollaron algunas obras de impermeabilización y drenajes en vaguadas para la segregación de aguas de escorrentía, evitando así su contacto con aguas contaminadas o rocas y suelos con sulfuros, y pudieran derivarse directamente al río.

En paralelo, se ha trabajado con algunas soluciones experimentales o complementarias, tales como el sellado y drenaje de pistas, la instalación de pantanales experimentales, el extendido de enmiendas orgánicas y encalantes con espumas de carbonatación de azucareras (carbocal), utilizándolas como agentes neutralizantes y fertilizantes en zonas puntuales del emplazamiento, o procesos de evaporación forzada de aguas ácidas sobre las balsas de almacenamiento. Los resultados en estos últimos casos han sido parcialmente exitosos en un principio, aunque no han mantenido sus expectativas en el medio-largo plazo o han resultado poco eficientes y económicos.

También se comenzó a considerar la posible aplicación de suelos artificiales (tecnosoles), con referencia de resultados satisfactorios en la recuperación de antiguas labores mineras, tales como la mina de lignito de As Pontes (A Coruña), de sulfuros metálicos de Touro (A Coruña), de la faja pirítica de Huelva y de Portugal, Mina La Zanja (Cajamarca, Perú), etc., así como de suelos contaminados por la rotura de la presa de Aznalcóllar (Sevilla).

Los tecnosoles se preparan a medida, fabricados a partir de subproductos y materiales residuales orgánicos e inorgánicos, no tóxicos ni peligrosos, y son capaces de realizar funciones productivas, de modo similar a los suelos naturales a los que imitan en composición y propiedades, en los que cada tipo posee capacidad variable de neutralización, tampón, adsorción, reducción-oxidación, aumento de fertilidad, etc. También realizan funciones ambientales, con doble beneficio pues, además de mejorar los procesos de remediación, valoriza los residuos evitando o reduciendo su abandono, vertido o incineración, y conforme a los principios que rigen en una economía circular. La aplicación al terreno se puede hacer en forma de lechos, capas o barreras, creando nuevos suelos y/o construyendo humedales reactivos.

En 2014 se iniciaron los primeros contactos con los expertos del Departamento de Edafología de la Facultad de Biología de la Universidad de Santiago de Compostela, pioneros en el desarrollo y estudio de los tecnosoles, acordando diseñar una serie de ensayos piloto para la aplicación de tecnosoles en el emplazamiento de Saelices el Chico.

En los años 2015 y 2016 se llevó a cabo la caracterización inicial de los distintos suelos y terrenos existentes en el emplazamiento de Saelices. Se tomaron muestras de suelo en las distintas zonas para el análisis de parámetros físico-quí-

micos característicos y se analizaron las diversas aguas presentes en el emplazamiento para establecer una modelización termodinámica de las cinéticas de reacción que ocurren en las aguas recogidas. Con ello se consiguió establecer las características edafogeoquímicas de cada sector.

En líneas generales se describieron suelos muy pobres en C orgánico (con poco poder reductor), y macronutrientes (N, K), que originaban una escasa actividad biológica y producción de biomasa y necromasa que pudieran minimizar los procesos oxidativos. Tampoco había presencia de carbonatos de ningún tipo y la relación $\text{Ca/Mg} < 1$ suponía un desequilibrio indeseado. En general se trataba de suelos con bajo pH y con ausencia de coloides de carácter reactivo (oxihidróxidos de Fe y Al) con capacidad de retención en procesos de adsorción o acomplejamiento mediante formación de agentes quelantes.

En lo que respecta a las aguas muestreadas en todo el emplazamiento, desde el punto de vista químico, en general, se trataba de aguas hiperácidas, hiperoxidantes e hiperconductoras, con elevadas concentraciones iónicas entre los que destacan los sulfatos (hipersulfatadas), siendo también significativas las anomalías por exceso de los elementos tóxicos Mn, Al (Al^{3+}), Cu, Ni y Zn, además del U.

Se diseñaron una serie de ensayos piloto iniciales para constatar sobre el terreno las ventajas de la utilización de estos tecnosoles: la creación de un humedal reactivo, la disposición superficial de varias fórmulas de tecnosol para compararlo con el suelo primigenio, y la aplicación directa sobre aguas de lixiviados de tecnosol.

Toda esta serie de experimentos iniciales del uso de tecnosoles desembocaron en la necesidad de ampliar los objetivos mediante un nuevo proyecto de investigación que, además de mejorar la calidad de las aguas ya existentes, evitara la formación y generación de nuevas aguas de carácter ácido a lo largo del tiempo. Para ello, se pretendía aplicar tecnosoles sobre una cuenca de superficie media que se comportara como una unidad cerrada, buscando asegurar la representatividad de los datos obtenidos, al tiempo que permitiera evaluar la evolución en cuanto a la calidad del agua existente y de las nuevas aguas que pudieran formarse. Este es el punto de partida de un proyecto I+D denominado genéricamente como proyecto TEKURA.

PROYECTO TEKURA. UTILIZACIÓN DE TECNOSOLES PARA EVITAR LA GENERACIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS EN MINERÍA DE URANIO

El objetivo principal del proyecto TEKURA es el desarrollo de una metodología, producto y tratamiento capaz de evitar la formación de las aguas ácidas, que aúne el empleo de diferentes compuestos bioactivos y la utilización de distintas especies vegetales, como solución ambiental pasiva a la presencia de drenajes ácidos.

Se determinó un área de aplicación heterogénea pero representativa del resto del emplazamiento de la mina de Saelices. La extensión de esta zona es de 52 hectáreas, y corresponde con un antiguo hueco minero (Corta Fe-1) que fue restaurado mediante relleno con los estériles de mina apilados en escombreras durante la fase de explotación,

hasta alcanzar unas cotas topográficas muy similares al perfil original del terreno.

Sobre esta superficie se dispuso una estructura de confinamiento formada por una serie de capas de materiales naturales disponibles en el propio emplazamiento:

- Arcosas arcillosas, como capa inicial sobre los estériles de mina, con fines de impermeabilización frente a posibles emanaciones de radón.
- Estériles de mina seleccionados para prevenir fenómenos erosivos.
- Suelos disponibles para facilitar la implantación vegetal y la integración paisajística (Figura 2).

Destacar la pobreza del suelo disponible empleado, procedente de materiales cuaternarios de tipo raña, pobres en nutrientes (N-P-K), con bajos contenidos en C, escaso crecimiento vegetativo y pobre actividad biótica, que unidos



Figura 2. Aspecto inicial de los terrenos de la Corta Fe-1 restaurada, previo al inicio del proyecto TEKURA (febrero-2018).

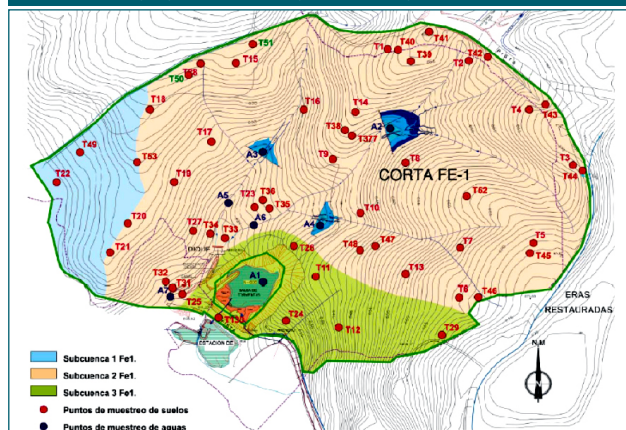


Figura 3. Sectorización y caracterización inicial de terrenos en área de aplicación del proyecto TEKURA.



Figura 4. Vista de la Planta de elaboración de tecnosoles para el proyecto TEKURA.

a un clima continentalizado generan una fuerte tendencia erosiva y con elevados niveles de sulfatos.

La caracterización inicial de los suelos del proyecto TEKURA señalaba una serie de conclusiones sobre los mismos:

- Bajos contenidos de C y N, limitando la actividad biológica.
- Desequilibrios en las relaciones C/N y C/N/P, con valores negativos.
- Elevada presencia de protones, que favorece el movimiento de los iones de Al reticular de las arcillas hacia posiciones de cambio, provocando la descomposición de las mismas.
- Pobreza de K, que dificulta el crecimiento vegetativo.
- Ausencia de coloides que pudieran absorber o acomplejar metales pesados y sulfatos. Bajos contenidos de Al y Fe reactivos (oxihidróxidos coloidales) (Figura 3).

El proyecto TEKURA parte de la premisa general de elaborar los tecnosoles necesarios en el propio emplazamiento minero de Saelices el Chico, reduciendo la huella de carbono generada por un transporte del producto final a largas distancias. Por tanto, se diseña la construcción de una planta de elaboración de tecnosoles, similar a las plantas clásicas de compostaje (con especial atención a la impermeabilización de los suelos y la recogida y gestión adecuada de lixiviados), con una capacidad nominal de producción de hasta 27.000 t/año. La construcción de dicha planta se lleva a cabo entre junio de 2017 y febrero de 2018 (Figura 4).

El plazo de desarrollo del proyecto, se estimó en 3 años. Las organizaciones participantes en el proyecto fueron:

- ENUSA, actuando como coordinador del proyecto.
- EMGRISA (Grupo ENUSA), como operador encargado de la elaboración de tecnosoles y logística de materiales.
- UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA, como tecnólogo del proyecto.
- CIEMAT, encargado del estudio de revegetación sobre tecnosoles.

El proyecto fue presentado como proyecto I+D a finales de 2016 al CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), quien participó en la cofinanciación del mismo.

La Junta de Castilla y León autorizó en marzo de 2018 la instalación de tratamiento de residuos en el marco exclusivo de dicho proyecto TEKURA, otorgando un número de identificación de la misma (NIMA) e identificando a ENUSA como gestor de residuos no peligrosos en el ámbito de la restauración minera del Centro de Saelices el Chico, contemplando que la totalidad de los tecnosoles que se iban a elaborar en dicha planta eran de uso exclusivo para los fines de restauración minera del emplazamiento.

En virtud de la caracterización de los suelos, se realizó un diagnóstico de las necesidades y actuaciones necesarias para la recuperación de dichos suelos, definiendo una serie de tecnosoles idóneos para su aplicación en el área de estudio:

- Tecnosol reductivo, hace descender el Eh y reduce la entrada de oxígeno en las aguas. Se aplicaron sobre los lechos de los humedales reactivos.
- Tecnosol ándico, contiene formas de C recalcitrante que le proporcionan capacidades reductoras, y también coloides de carga positiva y elevada reactividad capaces de fijar aniones, fundamentalmente sulfatos.

- Tecnosol eutrófico, contiene complejos organominerales de Al y Fe y formas de C recalcitrante que le proporcionan capacidades reductoras. También incluye componentes calcáreos con capacidad de neutralización de ácidos, y elevados contenidos de materia orgánica complejante de metales pesados. Posee altos contenidos en nutrientes biológicos (C, N, P y K) que favorece el desarrollo de la vegetación. Se extienden como capa final en toda la superficie.
- Tecnosol calcáreo, incluye componentes calcáreos de baja solubilidad con capacidad de neutralización de ácidos en suelos. Se disponen en zonas más elevadas para que actúen desde el primer momento a través de las escorrentías.
- Tecnosol férrico, con presencia de coloides de carga positiva y elevada reactividad capaces de fijar aniones, fundamentalmente sulfatos. Se incorporan en zonas de flujo de agua, *talwegs*, etc.

Se diseñó un extendido de dos capas de tecnosol en toda el área, con un espesor medio de 5 cm para cada capa (Figura 5).

Las cantidades finalmente aplicadas de cada tipo de tecnosol en el proyecto fueron las que aparecen en la Tabla 1.

La búsqueda, catalogación y gestión de los residuos que entrarían a formar parte de los tecnosoles definidos partía de una caracterización inicial de cada tipo de residuo incluido en la lista autorizada, y posteriormente se llevaba a cabo un seguimiento mediante muestreo y analítica de cada tipo de residuo y origen cada 500 t, o al menos, una vez al año.

Los criterios básicos de admisión de estos residuos eran que no tuvieran la caracterización normativa de residuos peligrosos, ni residuos SANDACH de categoría 1, ni radiactivos. Las analíticas de control incluían, entre otros parámetros, pH, Eh, %C, %N, Ca, Mg, Na, K, Al, TPH, BTEX, metales pesados y metaloides.

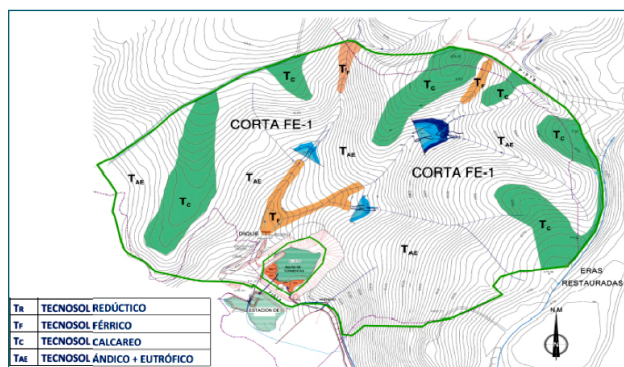


Figura 5. Zonificación de tipos de tecnosoles a aplicar en el proyecto TEKURA.

TIPO DE TECNOSOL	SUPERFICIE APLICACIÓN (ha)	CANTIDADES APLICADAS (t)
TECNOSOL FÉRRICO	1,8654	961
TECNOSOL CALCÁREO	8,3067	3.408
TECNOSOL ÁNDICO	40,1330	19.532
TECNOSOL EUTRÓFICO	50,3051	19.794
TECNOSOL REDUCTIVO	0,7972	4.025
TOTAL:	51,1023	47.720

Tabla 1. Tipos de tecnosol y cantidades aplicadas en el proyecto TEKURA.



Figura 6. Zona de maduración bajo cubierta en la Planta de elaboración de tecnosoles.



Figura 7. Proceso de comienzo de mezclado de componentes para la fabricación de tecnosol.

La operativa de la planta era muy similar a la de cualquier planta de compostaje. Los residuos o productos, una vez cumplieran con los análisis de admisibilidad, se almacenaban en función de su tipología. El proceso comenzaba con la mezcla, mediante pala cargadora, de los componentes según las proporciones fijadas para cada tipo de tecnosol, conformando pilas de sección triangular de 1,75 m de altura, aproximadamente. Estas pilas se humectaban hasta alcanzar el porcentaje adecuado, buscando favorecer las condiciones de descomposición aerobia de la materia orgánica. En las primeras etapas de maduración del tecnosol se vigilaban los parámetros característicos (temperatura, humedad, relación C/N y pH), realizándose volteos y/o riegos de las pilas cuando era necesario para controlarlos (Figuras 6 y 7).

Los tecnosoles fabricados también se sometían a analíticas de control, al menos una cada 4.000 t producidas, antes de ser extendidos en el área de aplicación. En dichas analíticas se controlaban límites de metales, límites de lixiviación, contaminantes orgánicos, microorganismos y ensayos de ecotoxicidad. Anualmente, también se realizaba un seguimiento de cada tipo de tecnosol ya aplicado sobre el terreno, con un muestreo aleatorio de toma de muestra compuesta procedente de 5 puntos.

Se construyeron un total de tres humedales reactivos en el área TEKURA, situados estratégicamente en la confluencia de las líneas principales de drenaje de escorrentía superficial. En su lecho se dispuso un espesor mínimo de 30 cm de tecnosol reductor y una fina capa de biomasa vegetal (necesidad de elevados contenidos de C), cubriéndose el conjunto con un espesor mínimo de 30 cm de agua. En los bordes del humedal se plantaron al inicio de la primavera especies palustres (*Thypha latifolia* y *dominguensis*).



Figura 8. Etapas finales de extendido en proyecto TEKURA (mayo-2020).

A lo largo de la superficie de aplicación del proyecto se instalaron una serie de piezómetros para controlar las interacciones entre los tecnosoles y las aguas relacionadas con el área TEKURA, tanto subterráneas como superficiales.

Los resultados observados en los análisis de las muestras recogidas en los piezómetros superficiales muestran una capacidad de absorción de agua por parte de los tecnosoles de forma que solo percola agua hacia la multicapa de protección en casos de lluvias copiosas y que duran varios días. En esos casos, los lixiviados que discurren por las capas drenantes de la multicapa de cobertera presentan valores de pH de 6,5-8,5, conductividad con valores del orden de 1.200-2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, contenidos en sulfatos del orden de 260-1.000 mg/l y potencial redox en la franja 400-500 mV, es decir, se produce una mejora significativa de las aguas infiltradas (Figura 8).

También se instalaron 5 piezómetros profundos para comprobar la carencia de interactividad entre el tecnosol y las

PARÁMETRO	UD.	SUELO INICIAL	SUELO SUBYACENTE DE TECNOSOL	TECNOSOL
pH H_2O		4,9	8,0	9,5
pH KCl		3,9	7,5	8,7
C	%	0,4	0,7	7,0
N	%	<0,01	<0,01	0,35
P	mg/kg	286	406	4.000
K	mg/kg	4190	4000	18.270

Tabla 2. Parámetros característicos de los suelos iniciales, suelos subyacentes y tecnosoles aplicados en proyecto TEKURA (Datos expresados como Mediana de valores).

AGUAS BALSA DE TORMENTAS (Receptora final aguas de escorrentía proyecto TEKURA)										
AÑO	pH	Eh (mV)	C.E. (mS/cm)	SO_4^{2-} (mg/L)	Mg (mg/L)	K (mg/L)	Al (mg/L)	As ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Cd ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Mn (mg/L)
2016	3,1	757	8,9	9.019	1.205	14	160	64	100	178
2018	3,4	670	5,5	11.018	1.615	22	163	130	45	195
2019	3,5	682	5,5	8.208	1.740	30	174	120	63	189
2020	4,4	540	7,0	3.189	637	213	38	38	39	78

Tabla 3. Evolución de las propiedades físico-químicas de las aguas de la Balsa de Tormentas (Datos expresados como Mediana de valores).

AGUAS SUPERFICIALES EN ÁREA TEKURA										
CONCEPTO	pH	Eh (mV)	C.E. (mS/cm)	SO_4^{2-} (mg/L)	Mg (mg/L)	K (mg/L)	Al (mg/L)	As ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Cd ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Mn (mg/L)
Escorrentías antes de tecnosol	3,7	693	8,1	9.249	1.297	13	205	140	91	161
Escorrentías después de tecnosol	7,4	449	2,7	1.226	125	207	0,1	25	0,5	3,4
Humedal redúctico	7,8	331	7,4	4.349	885	298	0,2	67	0,5	15,0

Tabla 4. Evolución de las propiedades físico-químicas de las aguas de escorrentía y humedales redúcticos (Datos expresados como Mediana de valores).

aguas subterráneas que inundan el hueco relleno con es-
tériles mineros, así como constatar la ausencia de afección sobre las aguas subterráneas en el entorno de la planta de elaboración de tecnosoles. Las analíticas realizadas infieren que no existen interacciones apreciables entre la actividad relacionada con tecnosoles y las aguas subterráneas del área de proyecto.

En lo que respecta a las aguas superficiales de escorrentía, se constató de forma empírica la imposibilidad de recoger muestras de aguas en regímenes pluviométricos por debajo de los 30 l/m^2 , lo que resulta indicativo de la elevada capacidad de retención de agua de estos compuestos.

También se ha constatado cómo los tecnosoles incorporados en un espesor total de 10 cm trasladan sus propiedades hacia los suelos subyacentes sobre los que se aplican. Se tomaron muestras de los 10 cm iniciales del suelo primigenio, observando el incremento de la capacidad de neutralización de ácidos y la fertilidad de los mismos (Tabla 2).

Las aguas de escorrentía que discurren a lo largo del área TEKURA finalizan su trayecto en la balsa de tormentas, donde también se recogen aguas procedentes del manto freático que inunda la antigua Corta Fe-1. Esta mezcla de aguas de distinta procedencia y calidad impide la recuperación total de las mismas pero sirven de indicador del cambio de características que los tecnosoles han provocado en las aguas superficiales y subálveas (las que circulan a través de las capas drenantes de la multicapa de protección, y que también desembocan en la balsa de tormentas) (Tabla 3).

La reacción de mejora en las aguas de la balsa de tormentas es bastante clara, con una subida de pH de una unidad, alcanzando el umbral de 4 y rompiendo el tampón férrico ($\text{pH} = 2,6-2,9$) de proliferación del Fe^{3+} . En paralelo se observa un descenso de los valores de Eh y concentraciones de sulfatos, así como de los metales más significativos, que confirman la tendencia de mejoría.

En las aguas superficiales, la acción conjunta de los tecnosoles y los humedales reactivos hace más patente el cambio en la evolución de la calidad de las aguas, pasando de aguas ácidas a valores próximos a la neutralidad. El potencial redox desciende de hiperoxidante a oxidante (del orden de 400-500 mV). La conductividad y la concentración de sulfatos descienden de forma importante (hasta 10 veces

menos que los valores iniciales), al igual que el Mg y el Al. Los valores de K, interesantes para los procesos vegetativos, aumentan con el uso de los tecnosoles, y los elementos de riesgo descienden igualmente (Tabla 4).

En los humedales reactivos se produce un descenso notable del Eh (hasta valores inferiores a 300 mV) y se reduce la entrada de O_2 en las aguas, al tiempo que se reduce la estabilidad del Fe^{3+} y de otros oxidantes presentes. Se reduce entonces la velocidad de oxidación de los sulfuros, desestabilizando los sulfatos y neoformando sulfuros. El pH normal de funcionamiento de las aguas de estos humedales se sitúa siempre en el entorno 7-8.

En el apartado de estudio de la revegetación a emplear, hubo de tenerse en cuenta las diferentes características físico-químicas de los tecnosoles superiores y los suelos primigenios que se ven modificados por la presencia de los tecnosoles suprayacentes. De esta forma se buscaron especies vegetales capaces de enraizar rápidamente, que crearan una cubierta vegetal autosostenible en el tiempo, y sin comprometer la capacidad de retorno al ecosistema propio del entorno.

La masa vegetal existente en el área TEKURA antes de la aplicación de tecnosoles era muy discontinua, y con poca variedad de especies (matorrales dispersos de cistáceas y algunas gramíneas diseminadas), lo que favorecía los procesos erosivos en los períodos de lluvia. Se realizó un estudio completo, en invernadero y condiciones controladas, de las especies de herbáceas silvestres más proclives, obteniendo una serie de mezclas de semillas, aptas para su implantación en las distintas zonas del proyecto. Es importante destacar que la cubierta vegetal alcanzó el 98 % del terreno donde se aplicó tecnosol frente a la germinación inexistente en la parcela de control (pequeñas cuadrículas de suelo sin aplicación de tecnosol y con la misma siembra de semillas herbáceas) (Figura 9).

Como conclusiones generales del proyecto TEKURA, cabe citar que se ha logrado la recuperación de la cobertura edáfica, así como la mejora química de las aguas superficiales y subálveas en el entorno de la Corta Fe-1 restaurada, mediante la utilización conjunta de tecnosoles y de humedales reactivos, diseñados, formulados y elaborados a partir de materiales de la propia mina y de residuos o subproductos de bajo valor del entorno más próximo, minimizando así la huella de C del previsible destino de estas sustancias en vertedero y reutilizando estos compuestos en la recuperación ambiental, la regeneración de la actividad y productividad biológica, la biodiversidad y el paisaje de un sistema fuertemente degradado por las actividades antrópicas, todo ello encuadrado bajo los principios que rigen la economía circular (Figura 10).

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Macías-García, F.; Bao, M.; Camps Arbostain, M. (2007): "Valorización biogeoquímica de residuos por medio de la elaboración de Tecnosoles con diferentes aplicaciones ambientales". *Aguas & Residuos*; pp.12-25.
- Arévalo, R.; Criado, M.; Ruiz, J. (2009): "Proyecto de restauración y clausura del Centro de ENUSA en Saelices el Chico (Sa-



Figura 9. Resultados del proceso de revegetación sobre los tecnosoles aplicados.



Figura 10. Aspecto final del área de aplicación de tecnosoles del proyecto TEKURA (abril 2020).

lamanca)". *Revista ALFA - Consejo de Seguridad Nuclear* nº 5; pp. 41-47, Madrid.

- Macías-García, F.; Camps Arbostain, M.; Macías, F. (2009): "Utilización de Tecnosoles derivados de residuos en procesos de restauración de suelos de la mina Touro". *Minería Sostenible. Cámara Oficial Mineira de Galicia*; pp. 651-661. A Coruña.
- Macías-García, F.; Fontán, L.; Otero, X. L.; Pérez Llaguno, C.; Camps Arbostain, M.; Macías, F. (2009): "Recuperación de aguas ácidas de la mina Touro mediante sistemas integrados de barreras reactivas con diferentes Tecnosoles y humedales". *Minería Sostenible; Cámara Oficial Mineira de Galicia*; pp 963-973. A Coruña.
- Macías Vázquez, F. (2014): "Recuperación de suelos, aguas y ecosistemas en la Mina de Touro". *Laboratorio de Tecnología Ambiental; Universidad de Santiago de Compostela*.
- Lozano, F.; Ruíz Sánchez, J. (2015): "Clausura de las minas de uranio de La Haba (Badajoz) y Saelices el Chico (Salamanca)". *Revista Nuclear España* enero-2015 – *Sociedad Nuclear de España*; pp. 39-44. Madrid.
- Escolano O., Lacal M., Millán R., Macías F., Vecillas I., Hernández I., Girón J.L. (2020): "Investigación y desarrollo de compuestos bioactivos a base de tecnosoles, para evitar la generación de drenajes ácidos en minería de uranio-Proyecto TEKURA". *IX Simposio Nacional sobre Control de la Degradación y Recuperación de Suelos (CONDEGRES-2020)*.
- Arán, D.; Santos, E.S.; Abreu, M.M.; Antelo, J.; Macías, F. (2021): "Use of combined tools for effectiveness evaluation of tailings rehabilitated with designed Technosol". *Environ Geochem Health* (<https://doi.org/10.1007/s10653-021-01118-3>). Springer Nature B.V. ■