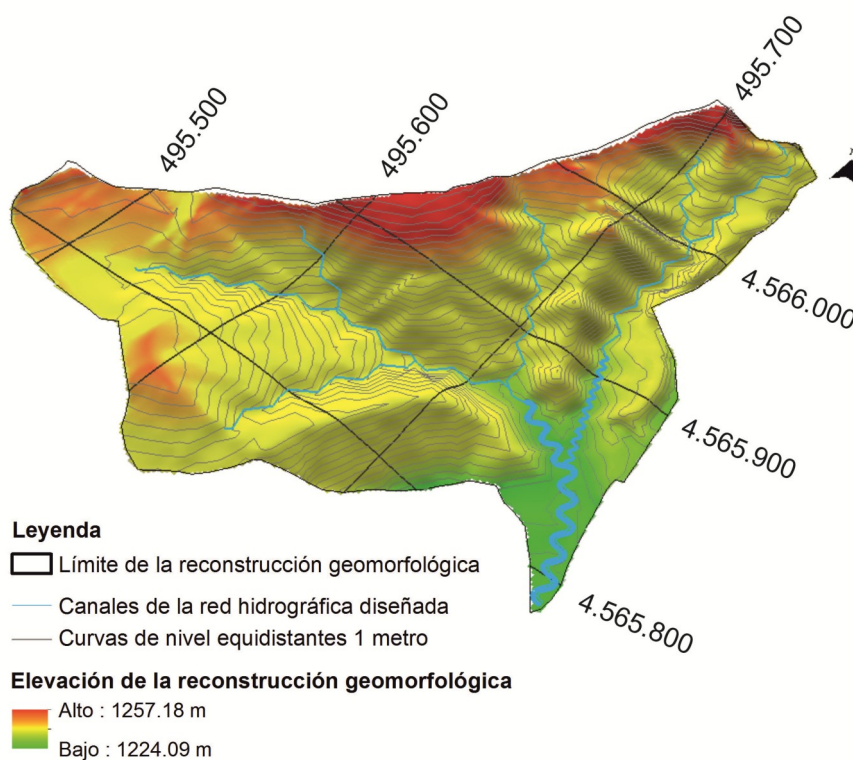


# El método *Geofluv* y el software *Natural Regrade*

Minería sustentable a través de la mejora significativa y eco-eficiente de la restauración de pasivos mineros: Un enfoque diferente de la restauración basado en la geomorfología dinámica (RGD)



J.F. Martín Duque

Departamento de Geodinámica  
Universidad Complutense  
28040 Madrid (España)

joefco@geo.ucm.es



## **Síntesis**

El método GeoFluv (patentado en EEUU, <http://www.geoflucv.com/home.html>) y el *software* Natural Regrade que lo desarrolla (Carlson Software, <http://www.carlsonsw.com/>), en adelante GeoFluv-Natural Regrade, permiten garantizar la máxima estabilidad geomorfológica, desde el corto al largo plazo, de las restauraciones llevadas a cabo en huecos y escombreras mineras. Ello permite obtener, simultáneamente, beneficios económicos, sociales y ecológicos, en tanto se minimiza el mantenimiento de las superficies restauradas y se maximiza su potencial ecológico y productivo. En definitiva, el método promueve la mayor sostenibilidad posible de los terrenos que han tenido una ocupación temporal de la actividad minera, favoreciendo y potenciando otros usos futuros. Todo ello mediante la construcción de relieves que han sido diseñados sobre la base de principios científicos proporcionados por la Geomorfología y la Hidrología).

### **1. ¿Cuál es el fundamento de GeoFluv-Natural Regrade?**

Tratando de sintetizar al máximo, este método se pregunta: ¿cuáles serían las formas del terreno más estables en el espacio minero que precisa ser restaurado? Y una vez interpretados esos *landforms*, se diseñan y se construyen. El método comienza, pues, con la identificación de las formas del terreno que son estables para los materiales y contexto (fisiográfico y climático) objeto de actuación, que sirven como ‘referentes’ o ‘análogos’ para ser replicados. A partir de su identificación es preciso medir y obtener una serie de parámetros morfológicos y climáticos, que se incorporan como *inputs* del modelo y del *software*.

Precisando un poco más, el procedimiento GeoFluv-Natural Regrade (Carlson Software y Bugosh, 2005; Bugosh, 2006) identifica el tipo de red de drenaje (densidad y morfología de canales y valles) y el perfil de las laderas de los interfluvios que se formarían durante un periodo largo de tiempo, dados unos determinados materiales, fisiografía y clima. De este modo, las laderas y canales construidos son estables porque están en equilibrio con esas condiciones ambientales. En esencia, es como si se ‘comprimiera’ el tiempo que un paisaje necesita para ser estable, ‘construyéndolo’ con dicha estabilidad desde el principio.

Este nuevo método de restaurar espacios mineros es una alternativa a los existentes, cuya estabilidad a largo plazo está en muchos casos comprometida. De hecho, el método se ha desarrollado precisamente para solucionar un problema demasiado extendido a nivel global: la inestabilidad geomorfológica de restauraciones mineras caracterizadas por formas geométricas, laderas rectilíneas y drenajes artificiales. En su lugar, se busca crear paisajes armónicos con las condiciones geomorfológicas existentes, en lugar de ‘luchar’ contra dichas fuerzas. Así, mediante la estabilidad geomorfológica ‘permanente’ de las superficies restauradas se minimiza el riesgo de generar pasivos ambientales y externalidades.

Es preciso destacar que toda la argumentación que se hace en este documento se centra en el proceso de diseño y reconstrucción geomorfológica (topografía más disposición del sustrato que lo forma) de las restauraciones mineras, que es probablemente el aspecto menos desarrollado hasta el momento en este campo. Mientras tanto, todo el ‘estado del arte’ relativo a la reposición del suelo y a los procesos de revegetación son válidos, y se mantienen, para ser desarrollados sobre las formas del terreno diseñadas y construidas con GeoFluv-Natural Regrade.

## **2. El método GeoFluv-Natural Regrade como herramienta más avanzada, a nivel mundial, de un enfoque geomorfológico para las restauraciones mineras**

El método GeoFluv-Natural Regrade para la restauración ecológica de espacios afectados por minería es, en realidad, un desarrollo concreto, o una herramienta precisa, de una aproximación mucho más amplia, que podría definirse como la “introducción de criterios geomorfológicos para conseguir la máxima estabilidad de las zonas mineras restauradas, y maximizar así sus beneficios económicos, sociales y ecológicos”. Martín Duque *et al.* (2010) incluyen una discusión y desarrollo detallado de esta ‘poderosa’ idea. La base de este razonamiento es la siguiente: dado que la minería de superficie modifica las formas del terreno, y genera otras nuevas, la ciencia geomorfológica otorga criterios racionales para conseguir una mayor estabilidad de estas nuevas morfologías en el largo plazo. Estos criterios son ‘adicionales’, o mucho más completos, que los estrictamente geotécnicos, dado que hacen referencia, sobre todo, a la estabilidad ante la erosión hídrica (y no sólo ante la posibilidad de los movimientos referidos como ‘en masa’ o ‘gravitacionales’).

El desarrollo de este nuevo concepto para las restauraciones mineras surge dado que, a pesar del significativo desarrollo que han experimentado las técnicas de restauración minera en las últimas décadas, existen demasiados ejemplos de fracasos de las mismas. Estos fracasos son muy comunes en procesos de restauración que se han centrado en remodelar el terreno desde ópticas exclusivamente centradas en reducir el impacto visual, o en buscar sólo una estabilidad geotécnica, olvidando la resistencia ante la erosión hídrica y la funcionalidad ecológica de las formas del terreno restauradas.

En este contexto, el diseño y reconstrucción de formas del terreno desde una base experta (otorgada por la Geomorfología y la Hidrología) están demostrando ser decisivos para el manejo casi exclusivo de la escorrentía, o para la restitución de procesos ecológicos clave —tales como la funcionalidad biológica del suelo—. Ello es así porque las aproximaciones de restauración ecológica de terrenos afectados por minería que se basan en criterios geomorfológicos recuperan la ‘estructura’ de los ecosistemas, que se convierte así en el *hardware* esencial que permite una restitución adecuada de los procesos ecológicos.

En este contexto, el procedimiento GeoFluv-Natural Regrade no es una herramienta más, sino la más avanzada a nivel mundial dentro de este enfoque. De ello damos fe después de casi 20 años de trabajo en este campo.

## **3. Ejemplos de resultados del diseño**

El programa sustituye cálculos largos y tediosos por diseños rápidos y eficientes. Pero sobre todo, realizados con criterios científicos (geomorfológicos e hidrológicos). Estos diseños se concretan en mapas topográficos e imágenes tridimensionales de los paisajes resultantes de dichos diseños. Las figuras 1 a 7 muestran algunas imágenes al respecto de dos diseños de reconstrucción geomorfológica que hemos realizado en España durante el año 2011. A su vez, la página <http://www.geofluv.com/products.html> muestra algunos ejemplos más de salidas gráficas e imágenes tridimensionales.



Figura 1. Punto de partida para el diseño de reconstrucción geomorfológica de una cantera en Somolinos (Guadalajara, España). Esta cantera constituye un ejemplo de pasivo ambiental, caracterizado por un remodelado en terrazas, muy inestable ante la erosión hídrica. Foto Paisajes Españoles.

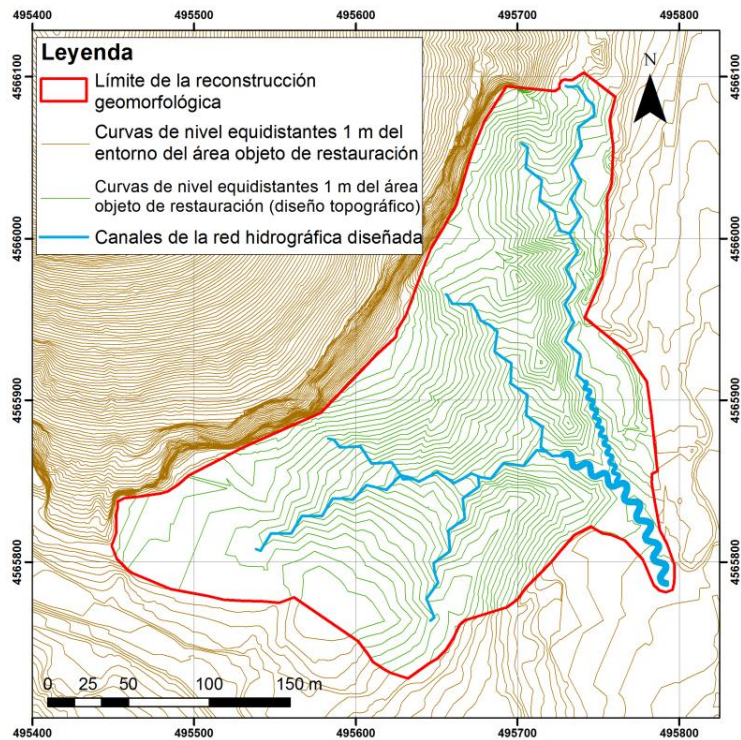


Figura 2. Mapa topográfico del diseño de reconstrucción geomorfológica de la cantera de Somolinos (Guadalajara, España).

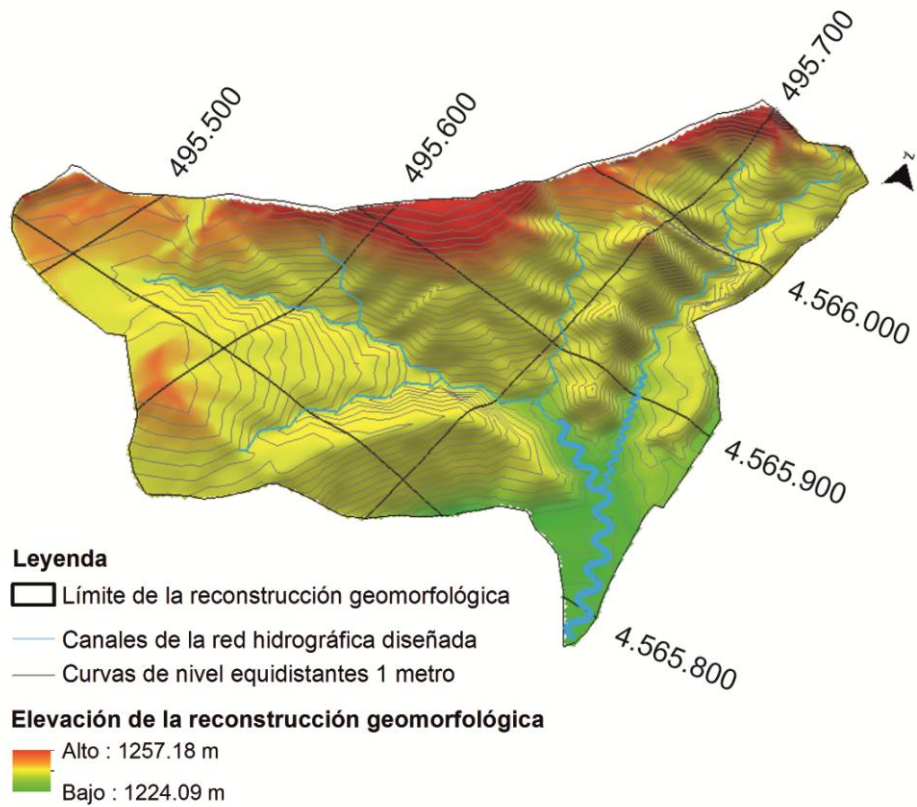


Figura 3. Vista 3D de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la propuesta de reconstrucción geomorfológica de la cantera de Somolinos (Guadalajara, España).

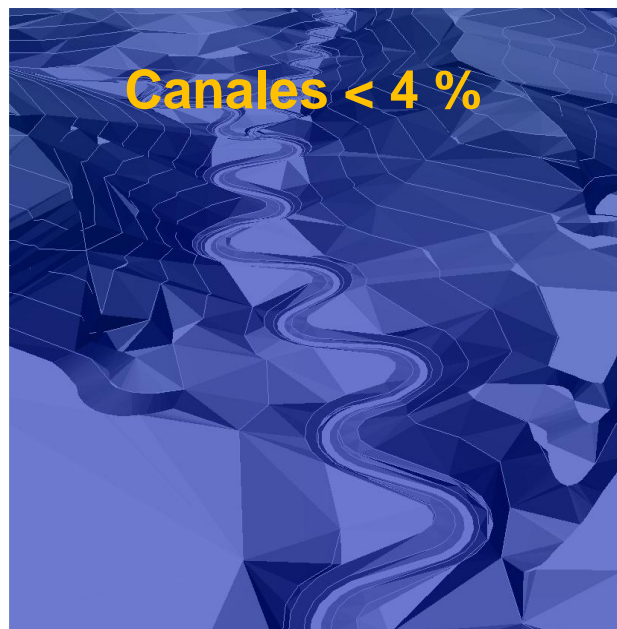


Figura 4. Detalle de un canal meandriforme, diseñado con GeoFluv-Natural Regrade, de la propuesta de reconstrucción geomorfológica de la cantera de Somolinos (Guadalajara, España).



Figura 5. Paisaje actual sobre el que se proyecta abrir una cantera de pizarras, objeto del diseño de reconstrucción geomorfológica mostrado más abajo. Cantera Los Quebraderos de La Serrana (Toledo, España).

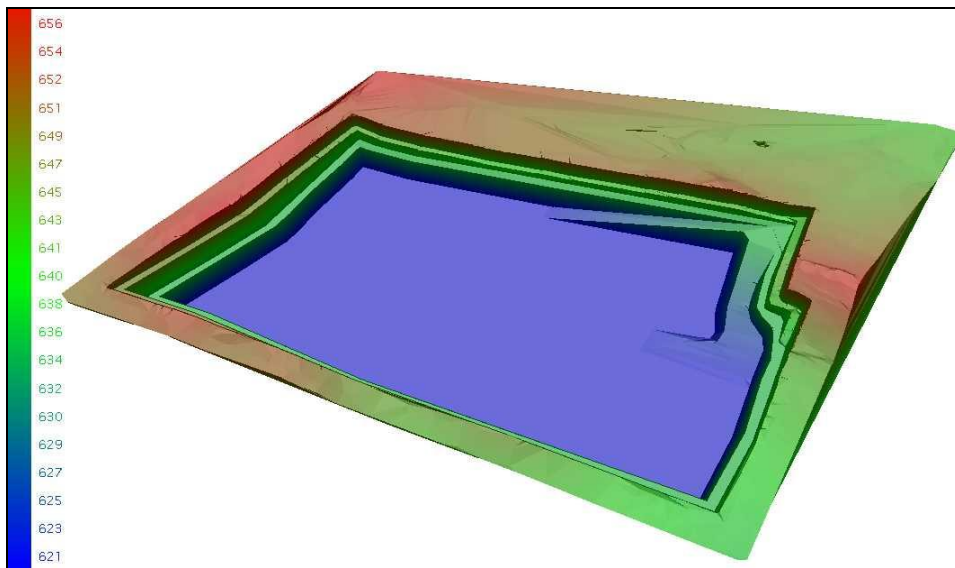


Figura 6. Vista 3D de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del hueco de explotación proyectado en la cantera Los Quebraderos de La Serrana, de 16 hectáreas de superficie (Toledo, España).

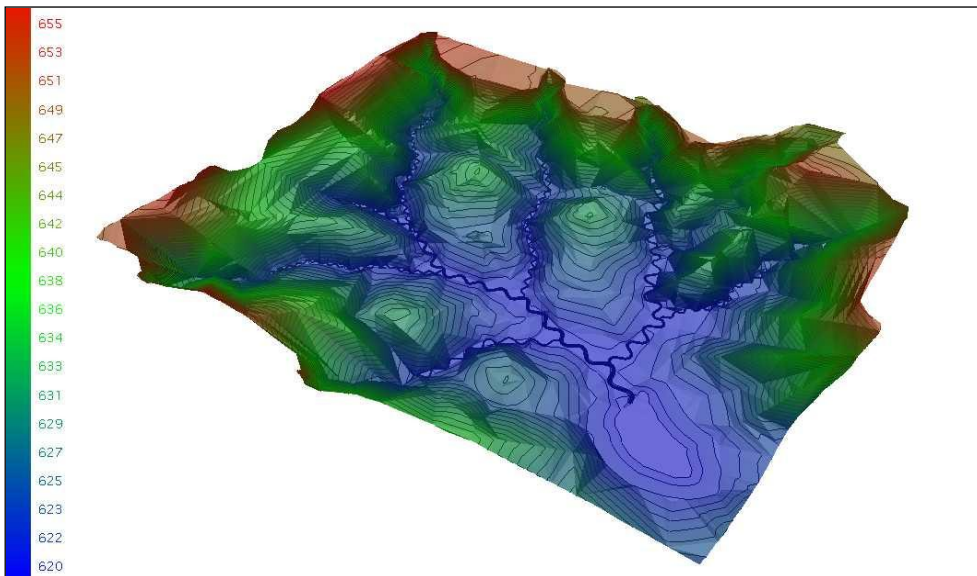


Figura 7. Vista 3D de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la propuesta de reconstrucción geomorfológica de la cantera Los Quebraderos de La Serrana (Toledo, España).

A su vez, el programa permite:

1. Realizar cálculos de volúmenes precisos sobre el movimiento de tierras más eficiente, identificando 'regiones' de excavación y relleno, y opciones óptimas de compensación entre excavación y relleno.
2. Realizar evaluaciones sobre la estabilidad (de canales y laderas) de distintas alternativas de diseño, mediante la comprobación de la capacidad erosiva de los canales (*shear stress*) o de la vulnerabilidad ante la erosión hídrica de las laderas mediante modelos empíricos como la RUSLE.

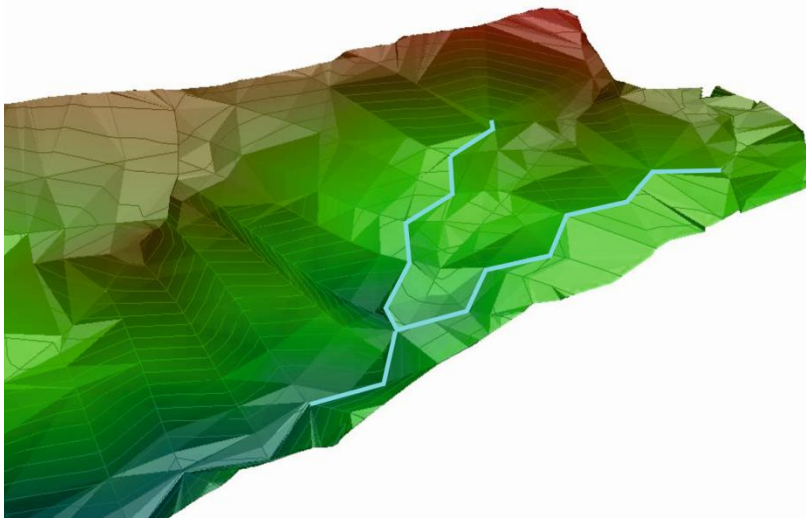
### 3. Modo de construcción y ejemplos de relieves construidos

La forma habitual de llevar a cabo estas restauraciones es mediante pantallas incluidas en la maquinaria, que muestran al operador, a partir de su posición mediante GPS y en función del diseño que llevan incorporado, las operaciones que debe realizar, si bien también se realiza mediante replanteamiento topográfico convencional, con estación total o GPS diferencial (Figura 8).



*Figura 8. Trabajos de replanteamiento topográfico para la construcción del relieve diseñado con GeoFluv-Natural Regrade en la cantera de Somolinos (Guadalajara, España)*

La figura 9 muestra el resultado de la primera fase de reconstrucción geomorfológica de la cantera de Somolinos (Guadalajara, España), con una superficie aproximada de una hectárea. La página <http://www.geofluc.com/solutions.html> muestra varios ejemplos más restauraciones llevadas a cabo con GeoFluv-Natural Regrade.



*Figura 9. Superior, sector norte de la cantera de Somolinos antes de su reconstrucción geomorfológica (fotografía aérea oblica de Paisajes Españoles S.A., abril de 2011); (centro) vista 3D del diseño de este sector; (inferior) sector norte de la cantera de Somolinos después de su reconstrucción topográfica, incluido el extendido de un coluvión carbonático que actúa como protosuelo (fotografía aérea oblica de Paisajes Españoles S.A., julio de 2011).*

## 4. Ventajas

### a. Beneficios económicos

Según lo descrito hasta ahora, y sin ofrecer más detalles sobre el método, la primera interpretación que un posible usuario podría hacer del mismo es que es probable que sus resultados sean realmente exitosos desde un punto de vista ecológico, y quizás social, pero que será un método de restauración muy caro. Sin embargo, si este método se está imponiendo en países como Estados Unidos, Canadá o Australia es precisamente, y sobre todo, por los beneficios económicos que reporta a quien lo desarrolla. Así:

- El coste adicional que requiere este tipo de reconstrucción se compensa, y acaba siendo menor, debido al ahorro de mantenimiento (explicado en el siguiente punto) y de estructuras artificiales (bajantes de hormigón, drenajes tipo rip-rap...).
- Se minimiza el mantenimiento de las superficies restauradas (prácticamente se elimina el mantenimiento y la reposición de drenajes, corrección de formas erosivas...), dado que las nuevas formas son estables desde el principio y a largo plazo.
- Se favorece la recuperación de las fianzas mineras. En países como Estados Unidos, las administraciones correspondientes no devuelven las fianzas mineras hasta que no se demuestra que hay una garantía clara de haber eliminado los riesgos de afección al medio ambiente. Por ello muchas empresas han adoptado y promovido este método.
- En casos extremos (como el ejemplo que aquí se describe de la cantera Los Quebraderos, Toledo, Castilla – La Mancha, España, figuras 5, 6, 7 y 10), la diferencia entre adoptar un enfoque como éste, o no, se traduce, ni más ni menos, en una autorización o no de la actividad minera (ver Zapico *et al.*, 2011). Es decir, una propuesta de explotación que había sido rechazada por cuestiones ambientales acabó siendo autorizada por el hecho de adoptar un enfoque de este tipo. En resumen, el beneficio económico en este caso es tan simple como tener o no tener actividad económica.

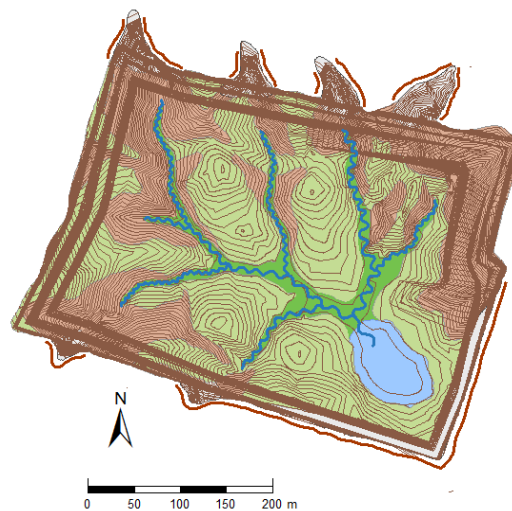
### b. Beneficios sociales

- Se incrementa la aceptación social de la actividad minera, al mostrar un compromiso inequívoco con la sostenibilidad del territorio sobre el que se actúa y se transforma.
- Se maximizan las posibilidades de uso de los terrenos restaurados (uso natural, forestal, pastizal, agrario, recreativo...).
- Se restauran los servicios ecosistémicos y el capital natural de las superficies afectadas, cuyos últimos beneficiarios son los habitantes del entorno.

### c. Beneficios ecológicos

- Se minimizan los riesgos de afección física o química al medio ambiente, al estabilizar los huecos y estériles mineros mediante el diseño de canales y laderas que se encuentran en un equilibrio dinámico con las condiciones del entorno.

- Dado que los canales construidos transportan agua y sedimentos como lo harían sus equivalentes naturales, las superficies restauradas se pueden conectar directamente con la red fluvial del entorno. Todo ello constituye un avance de integración ambiental sustancial con respecto a esquemas normativos rígidos, que no permiten conectar hidrológicamente las superficies mineras a su entorno (a veces se requieren balsas que necesitan de un mantenimiento indefinido, lo que supone un pasivo ambiental enorme para la actividad minera).
- Las restauraciones se realizan, casi exclusivamente, con estériles mineros, ahorrando materiales externos (hormigón, escolleras, diques...).
- Se obtiene una gran diversidad topográfica (se multiplica el rango de distintas pendientes y orientaciones de ladera), lo que maximiza la biodiversidad del entorno, mejorando incluso las oportunidades de las plantas y la vida silvestre con respecto a las condiciones de partida (Figura 10).



#### **LEYENDA**

- Canales
- Vallas de seguridad
- 1 Cortados rocosos
- 2 Canchales
- 3 Tomillares y espartales sobre lomas
- 4 Arbustos espinosos en fondos de vaguadas
- 5 Humedal

*Figura 10. Propuesta zonificación de hábitats, a partir del diseño de reconstrucción geomorfológica de la cantera Los Quebraderos de La Serrana (Toledo, España). La diversidad topográfica que se obtiene como resultado del diseño geomorfológico permite maximizar la diversidad de hábitats.*

- La diversidad de formas del terreno amplifica las posibilidades de infiltración de agua, que estará disponible para las plantas. Todo ello a diferencia de la mayoría de los diseños convencionales, en los cuales la filosofía es evacuar el agua hacia fuera de las zonas restauradas, que por tanto no estará disponible para las plantas. En el caso de pasivos con carga metalífera sulfurada (relaves) se pueden buscar soluciones químicas (uso de agentes neutralizantes) y físicas (mediante suelo compactado intermedio que “ahogue” el substrato

inferior. Se impedirá así el paso de oxígeno, en este caso, a una escombrera con carga metálica sulfurada, susceptible de ser oxidada y lixiviada.

- Se consiguen paisajes visualmente coherentes y muy atractivos, que consiguen la mayor integración visual posible, en tanto se basan, o replican, la fisiografía del entorno.

En definitiva, se produce la máxima integración ambiental (ecológica + social + económica), y por tanto la sostenibilidad, de la actividad minera en su entorno.

## **5. A modo de síntesis: hacia una minería sostenible**

En el momento actual, y a diferencia del pasado, la restauración de huecos y estériles mineros no se considera un gasto innecesario. Al contrario, el desarrollo normativo y una creciente sensibilidad ambiental 'global' lo han convertido en una parte esencial del proceso minero. Desde esta realidad, la adopción de las mejores prácticas de restauración de espacios afectados por minería, mediante un manejo experto del movimiento de tierras, basado en criterios científicos geomorfológicos, puede ser muy rentable económicamente, de igual modo que lo es el desarrollo de la mejor planificación posible de las labores de explotación.

Sobre este razonamiento, las mejores restauraciones posibles en minería son mucho más que construir escombreras mineras de forma tradicional, y a partir de ahí centrar todos los esfuerzos en la tierra vegetal y en la revegetación. Al contrario, las exigencias ambientales actuales y futuras de la población demandan los mayores estándares en la calidad de las restauraciones, de modo que las expectativas van dirigidas a la sostenibilidad de las zonas mineras restauradas. Entendido este concepto como la necesidad de "mantener la funcionalidad ambiental de los espacios restaurados para el beneficio de futuros usuarios del territorio". Y todo ello con el mantenimiento de la actividad económica minera.

## **6. Agradecimientos**

El grupo de trabajo que dirijo, que está desarrollando esta herramienta a través de cursos de formación, consultoría al sector minero e investigación (seguimiento de restauraciones, mejora del software...), en colaboración con Nicholas Bugosh, está compuesto por: Cristina de Francisco, Néstor Hernando, Cristina Martín, José M. Nicolau, Sara Nyssen, María Tejedor e Ignacio Zapico.

## **7. Referencias**

Bugosh, N., 2006. *Basic Manual for Fluvial Geomorphic Review of Landform Designs*. Office of Surface Mining of the US Department of the Interior, Denver, CO.

Carlson Software, Bugosh, N., 2005. *Fluvial Geomorphic Landscape Design Computer Software*. US Patent Office, publication number WO/2005/036331, international application number PCT/ US2004/02995.

Martín Duque, J.F., Sanz, M.A., Bodoque, J.M., Lucía, A. y Martín, C. 2010. Restoring earth surface processes through landform design. A 13-year monitoring of a geomorphic reclamation model for quarries on slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35: 531-548.

Zapico, I., Martín Duque, J.F., Bugosh, N., Balaguer, L., Campillo, J.V. , De Francisco, C., García, J., Hernando, N., Nicolau, J.M., Nyssen, S., Oria, J., Sanz, M.A., Tejedor, M. 2011. Reconstrucción geomorfológica en la restauración minera de la cantera Los Quebraderos de La Serrana de Toledo. *Energía y Minas*, 9: 32-37.