

RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS MEDITERRÁNEOS

José M^a Rey Benayas
Tíscar Espigares Pinilla
José Manuel Nicolau Ibarra
(editores)



ÍNDICE

Introducción: ¿Cuáles son los límites de la restauración de ecosistemas perturbados?	1
Capítulo I: Restauración de ecosistemas mediterráneos en España:	
Conclusiones de un Simposio	3
Capítulo II: Problemas y perspectivas de la utilización de leñosas autóctonas en la restauración forestal.....	11
Capítulo III: Dinámica y sucesión en bosques mediterráneos:	
modelos teóricos e implicaciones para la silvicultura.....	43
Capítulo IV: Importancia de la calidad de planta en los proyectos de revegetación	65
Capítulo V: Importancia e interpretación de la latencia y germinación de semillas en ambientes naturales.....	87
Capítulo VI: Restauración de poblaciones de plantas amenazadas	113
Capítulo VII: Restauración de riberas	141
Capítulo VIII: Restauración de ecosistemas dunares costeros	157
Capítulo IX: Diseño y construcción del relieve en la restauración de ecosistemas degradados: una perspectiva ecológica.....	173
Capítulo X: Técnicas de revegetación de taludes	189
Capítulo XI: Recuperación de hábitats para la fauna y prevención de impactos	215
Capítulo XII: Rehabilitación de suelos contaminados.....	227
Fotos	251
Índice temático	269

CAPÍTULO IX

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL RELIEVE EN LA RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS DEGRADADOS: UNA PERSPECTIVA ECOLÓGICA

José Manuel Nicolau Ibarra

Departamento Interuniversitario de Ecología. Universidad de Alcalá de Henares. 28871 Alcalá de Henares, Madrid. Tel.: 918855091. Correo electrónico: josem.nicolau@uah.es

1. ¿Cuál es el campo de la restauración ecológica en el que la reconstrucción del relieve es relevante?.....	174
2. Enfoques en el diseño de la topografía	175
2.1. El diseño del relieve con el objetivo de minimizar la exportación de agua y sedimentos sobre los ecosistemas acuáticos aguas abajo (off-site effects).....	175
2.2. El relieve como compartimento a integrar junto con el suelo y la vegetación en la construcción de un ecosistema funcional.....	177
3. Modelos conceptuales de relieves artificiales	178
3.1. Bases geomorfológicas para la construcción de las formas de relieve	179
3.2. Condicionantes para la construcción de la topografía.....	179
3.3. El modelo de plataforma-berma-talud.....	180
3.4. El modelo de imitación del relieve original	180
3.5. La cuenca hidrológica como unidad de restitución del relieve.....	181
3.6. La solución “Utrillas”	183
4. El uso de modelos matemáticos para el diseño de los relieves	184
4.1. Modelos disponibles	184
5. Conclusiones.....	186

Resumen

En este capítulo se abordan los aspectos geomorfológicos de la restauración de ecosistemas, de notable importancia para el desarrollo del ecosistema en su conjunto, por su participación en el suministro de agua y nutrientes a las plantas y por su influencia en la estabilidad del mismo frente a los fenómenos de erosión. La consideración de los aspectos geomorfológicos resulta especialmente pertinente para la reconstrucción de la topografía tras la degradación ambiental por movimiento de tierras producida por las actividades de ingeniería civil y minería. Hay dos enfoques en el diseño de las formas de relieve. El más habitual tiene como objetivo prioritario la protección de los ecosistemas acuáticos situados aguas abajo de los restaurados, mediante la construcción de topografías y estructuras que reduzcan al máximo la emisión de sedimentos y contaminantes y amortigüen los caudales máximos. El enfoque más ecosistémico se centra en la integración del compartimento geomorfológico con los del suelo y la vegetación en la conformación de un ecosistema funcional con capacidad de automantenimiento. El estudio de las complejas relaciones entre vegetación y erosión hídrica se advierte como un línea de investigación que aportará soluciones en este campo. Se analizan los tipos de modelos conceptuales de relieve que se han llevado a la práctica: el modelo plataforma-berma-talud, estable geotécnicamente pero no ecológicamente; el modelo de reproducción fiel de la topografía

original, inadecuado en áreas abruptas; y el modelo basado en la cuenca hidrológica como unidad de restauración, que se considera el más adecuado. Se presenta la experiencia de Utrillas (Teruel) como un ejemplo de este último tipo. Por otro lado, se revisan los modelos de erosión e hidrológicos disponibles como herramientas para el diseño de relieves, resaltándose el interés de la "RUSLE 1.06 for mined lands, construction sites and reclaimed lands" por su facilidad de uso.

Palabras clave: *Cuenca hidrológica, ecosistema, erosión, escorrentía, espacios degradados, geomorfología, impacto ambiental, ingeniería civil, minería, modelos de erosión, modelo plataforma-talud, off-site effects, on-site effects, relieve, restauración, RUSLE, topografía.*

1. ¿Cuál es el campo de la restauración ecológica en el que la reconstrucción del relieve es relevante?

La restauración de ecosistemas constituye una disciplina muy amplia, con objetivos y técnicas diferentes en función del tipo de ecosistema que haya sido degradado y de la intensidad de degradación. De la teoría ecológica se desprende que la degradación del medio natural por parte del hombre se puede producir por perturbación mecánica, sobre-explotación, contaminación (generación de residuos) y/o introducción de especies exóticas (Beeby 1993). Estos mecanismos de degradación pueden actuar de forma independiente o combinada.

Desde la ciencia del suelo se ha aportado una forma útil de clasificar los espacios degradados en medios terrestres: en virtud de la profundidad en que es afectada la "columna vertical" vegetación-suelo-subsuelo (Toy y Hadley 1987). Algunas actividades modifican sólo las características de la vegetación (talas, fuegos rápidos, patologías). Otras afectan a la vegetación y a algunas propiedades del suelo, sin eliminar totalmente los propágulos (pastoreo, vehículos todo terreno). Otras afectan a la vegetación, al suelo y al subsuelo, es decir, al elemento geológico-geomorfológico (minería a cielo abierto, carreteras, gaseoductos). En términos ecológicos esto equivale a decir que, en el caso de la degradación ambiental por "movimiento de tierras", resultan afectados los componentes de los ecosistemas que suministran los recursos (agua y nutrientes) a la vegetación: el suelo y la geomorfología.

La **Tabla 1** recoge la tipología de espacios degradados que se puede establecer en base al criterio de la profundidad de afección en la columna vertical (Gómez Sal y Nicolau 1999).

En cada caso las metodologías y técnicas de restauración son distintas. En la restauración de una mina a cielo abierto hay que reconstruir la geología, la geomorfología (red de drenaje incluida), el suelo (tierra vegetal), la vegetación y la fauna. En una zona sobrepastoreada o en una repoblación forestal se trabaja en la mejora del suelo y, sobre todo, con el material vegetal (revegetación), del que todavía quedan propágulos en el suelo. En la restauración de un ecosistema seminatural, básicamente se trabaja con los organismos vegetales y animales. Es en los ecosistemas afectados por movimiento de tierras donde la reconstrucción del relieve constituye una parte fundamental de la restauración. Y es en el caso de la minería a cielo abierto de gran superficie (carbón) donde, particularmente, la construcción del relieve presenta connotaciones ecológicas más profundas, al ser el primer paso en la restauración de un ecosistema funcional, a diferencia de los taludes de las infraestructuras lineales, cuyo objetivo de restauración no es tanto la conformación de un ecosistema, sino más bien minimizar los impactos ambientales de la obra de ingeniería, así como garantizar su funcionalidad técnica.

Tabla 1: Tipos de espacios degradados. Mecanismos de degradación: (1) Perturbación mecánica. (2) Sobre-explotación. (3) Contaminación - vertido de residuos. (4) Introducción de especies exóticas

COMPONENTES ALTERADOS DE LOS ECOSISTEMAS		
Vegetación	Vegetación + Suelo	Vegetación + Suelo + Geomorfología-Geología
Cultivos abiertos: setos vivos eliminados (2)	Suelos contaminados (3)	Áreas afectadas por actividades mineras (1,3)
Bosques con especies exóticas (4)	Cultivos en laderas abandonados, con erosión intensa (1,2)	Infraestructuras lineales (carreteras, ferrocarril, gaseoductos, canales, etc.) (1)
	Áreas sobrepastoreadas (2)	Vertederos y zonas periurbanas degradadas (1) (3)
	Áreas incendiadas con erosión intensa (1)	
	Replantaciones forestales en aterrazamientos, fallidas (1) (4)	

2. Enfoques en el diseño de la topografía

La construcción de relieves cada vez más estables es un objetivo perseguido desde dos puntos de partida o enfoques diferentes, aunque no excluyentes. Por un lado, se puede diseñar el relieve con el objetivo de garantizar la máxima viabilidad del ecosistema a restaurar (*on-site effects*), es decir, considerando el relieve como un compartimento del ecosistema, a integrar con el suelo y la comunidad vegetal en el proceso de construcción de un ecosistema funcional. Según el otro enfoque, más común y desarrollado, el relieve ha de cumplir el objetivo de emitir la menor cantidad posible de sedimentos y escorrentía hacia los cuerpos de agua situados aguas abajo del ecosistema restaurado, a fin de evitar afecciones sobre las poblaciones acuáticas (*off-site effects*) y conservar servicios ecosistémicos básicos relacionados con la calidad del agua (Ehrenfeld 2000).

Este último ha sido el objetivo que se ha perseguido de forma más explícita en el diseño de los relieves, por existir en algunos países una normativa ambiental de protección de los ecosistemas situados aguas abajo de las zonas alteradas por actividades mineras o constructivas (Clean Water Act y SMCRA en EEUU). A menudo, en este objetivo también va incluida de forma implícita la recuperación de un ecosistema funcional.

2.1. El diseño del relieve con el objetivo de minimizar la exportación de agua y sedimentos sobre los ecosistemas acuáticos aguas abajo (*off-site effects*)

Las aproximaciones más relevantes en este campo proceden del grupo de investigación australiano que ha desarrollado el modelo SIBERIA (Willgoose y Riley, 1994; 1998), del equipo canadiense orientado hacia la reproducción de paisajes naturales (Sawatski *et al.* 2000; Bender *et al.* 2000) y, de forma más clásica, de la aplicación de la USLE y sus modelos derivados, cuya metodología es comercializada por la International Erosion Control Association (Fifield, 1994).

La metodología de la International Erosion Control Association se centra no sólo en el diseño de formas de relieve estables, sino también el diseño y construcción de estructuras de seguridad que garanticen la no emisión de sedimentos y contaminantes desde los relieves restaurados a los cursos de agua en eventos pluviales extremos. La conformación de la topografía se enmarca en los denominados planes de control de la erosión y la sedimentación, de los que un buen ejemplo lo constituye la tecnología desarrollada y comercializada por Fifield (1994) en forma de *software informático*. Un Plan-tipo comprende los siguientes pasos:

1. Establecer la cantidad de sedimentos que se van a exportar a los cauces naturales, a partir de la relación Sedimentos retenidos/Sedimentos producidos (*Performance standard*)
2. Diseñar la topografía y estimar el volumen de escorrentía y la cantidad de sedimentos que producirá. La predicción se realiza aplicando la *Sediment Yield Equation*, que combina el modelo de erosión MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) y el hidrológico del Número de Curva.
3. Determinar la efectividad de los métodos complementarios de control de erosión (% de sedimentos que han de controlarse con las estructuras de control de erosión).
4. Dimensionamiento de las estructuras de control de la sedimentación.

Entre las medidas estructurales de control de la sedimentación se encuentran las trampas y balsas de sedimentos, los filtros de gravas, de balas de paja o de mallas, los diques y las cubiertas (**Fotos 51 y 52**).

El modelo SIBERIA parte de la premisa de que sin un adecuado diseño topográfico las actividades mineras tienen un elevado potencial de causar impactos ambientales severos, entre los que destacan la contaminación de los cursos de agua por erosión de las formas de relieve de las áreas restauradas. En consecuencia, el objetivo del diseño topográfico es minimizar tal impacto ambiental (Evans 2000). Para ello, el proceso de restitución topográfica consta de tres pasos:

1. Diseñar una morfología de relieve estable mediante el modelo de evolución topográfica SIBERIA.
2. Estimar la transmisividad de los sedimentos desde el relieve diseñado hacia las cuencas y cauces naturales aplicando un modelo predictivo de sedimentos: RUSLE o WEPP.
3. Valorar los cambios en la calidad del agua en los cauces naturales, mediante la aplicación de un modelo hidrológico que prediga los caudales y estimando las concentraciones de sedimentos a partir de los datos aportados por los modelos de erosión.

El grupo de investigación australiano pone el énfasis en la utilización de modelos predictivos para simular el comportamiento de los relieves hasta obtener el diseño que cumpla con los requerimientos de calidad de agua establecidos. Como más adelante se explica, este grupo es el más avanzado en la elaboración de modelos matemáticos para la restauración del paisaje. En la actualidad se encuentran en una fase de transferencia del conocimiento científico desarrollado hacia las empresas para su aplicación práctica.

Para Sawatski *et al.* (2000) el objetivo de un proyecto de restauración es reducir a cero los riesgos a largo plazo (*long term liability*). Entre dichos riesgos se incluyen:

- Baja productividad del suelo.
- Impactos sobre la calidad del agua: drenajes ácidos, metales pesados.
- Destrucción catastrófica del relieve restaurado: inestabilidad geotécnica de escombreras, ruptura de presas.
- Erosión hídrica intensa.

La metodología que propone este grupo canadiense para construir un relieve con unos niveles de exportación de sedimentos aceptables se basa en el análisis comparativo de cuencas naturales del entorno y consta de cuatro pasos:

1. Establecer la tasa máxima de exportación de sedimentos para la cuenca a restaurar, en función de los registros disponibles de las cuencas naturales del entorno.
2. Establecer los criterios de sostenibilidad del relieve a restaurar en términos de características de la escorrentía, tasas de erosión y capacidad de sustento de un ecosistema, a partir de ciertas características de los paisajes naturales circundantes como la topografía y la densidad de drenaje para los distintos tipos de suelo.
3. Establecer los criterios de funcionalidad de los cauces naturales que evacúan la escorrentía, principalmente en relación al régimen de caudales.
4. Establecer las características de los hábitats acuáticos a proteger: concentración de sedimentos; áreas de freza, alimentación, etc.

De esta manera, la acción restauradora se extiende más allá del área directamente degradada, hasta los ecosistemas acuáticos susceptibles de verse afectados (*off-site effects*).

2.2. El relieve como compartimento a integrar junto con el suelo y la vegetación en la construcción de un ecosistema funcional

Aparte del enfoque anterior, esencialmente geomorfológico, existe otro más ecológico, en el que la restauración se dirige hacia la integración del relieve, suelo y vegetación para la construcción de un ecosistema funcional. En efecto, desde una perspectiva más ecológica, restaurar es generar ecosistemas funcionales, esto es, con capacidad de automantenimiento y conectados con los ecosistemas circundantes (Carpenter 1998). Para ello es necesario manejar de forma integrada topografía, suelo y vegetación, a fin de optimizar la restitución de los procesos ecológicos clave. Diversos autores afirman que el suelo es el compartimento clave para conseguir la sostenibilidad del ecosistema restaurado (Palmer, 1992; Beeby, 1993), un suelo biológicamente funcional que posea los niveles apropiados de materia orgánica y nitrógeno, con unas activas tasas de mineralización derivadas de la actividad microbiana (Bradshaw, 1988).

Por otra parte, el compartimento geomorfológico condiciona notablemente el automantenimiento de los ecosistemas restaurados, por ser clave en el suministro de agua y nutrientes a las plantas, y por determinar la intensidad de la erosión, mecanismo de explotación abiótica que retrasa la sucesión ecológica. En este sentido, diversos autores han descrito los efectos que la erosión provoca sobre la vegetación de laderas restauradas, especialmente en el periodo inicial de implantación. Kapolka y Dollhopf (2001) afirman que una de las preocupaciones más importantes en relación a la restauración de laderas de fuerte pendiente es la erosión, por sus efectos negativos sobre el establecimiento de las plántulas. Loch (1997) indica que, en ambientes que sufren lluvias muy intensas, el crecimiento de las plantas y el riesgo de erosión hídrica están íntimamente unidos. Ello implica que la vegetación tiene menos oportunidades para establecerse en los periodos de menor erosión, lo que obliga a adoptar medidas de control. Haigh (1992) identificó la erosión intensa como uno de los factores causantes del progresivo deterioro de los pastizales inicialmente implantados con éxito en paisajes restaurados de la minería de carbón a cielo abierto en País de Gales. La alteración de las pizarras del sustrato hacia arcillas dio lugar a la formación de una capa impermeable a 30 cm de profundidad, que disminuyó la capacidad de infiltración del sustrato, incrementando la escorrentía y, por consiguiente, la erosión hídrica superficial. En ambientes mediterráneo-continentales el déficit hídrico –que es el principal factor limitante para las plantas– está frecuentemente asociado con erosión superficial intensa (Nicolau 1996; Nicolau y Asensio 2000). Entre ambos fenómenos se establece una interacción de retroalimentación positiva, ya que

como consecuencia de la erosión hay una disminución de la disponibilidad de agua para las plantas. Ésta es causada por la disminución de la profundidad del suelo (menor capacidad de almacenamiento de agua) y por la formación de una costra superficial que reduce la capacidad de infiltración (Pimentel y Harvey 1999).

La reducción de la capacidad de suministro de agua a las plantas por parte del suelo no es el único mecanismo mediante el cual la erosión hídrica ejerce una cierta explotación abiótica de los ecosistemas; también extrae nutrientes, propágulos (rizomas, semillas) e incluso organismos (microorganismos, principalmente), (Young 1992). Como mecanismo abiótico de explotación, retrasa la sucesión ecológica (Margalef 1968). Además, al reducir la producción de biomasa, disminuye la biodiversidad de los ecosistemas y su estabilidad, a través de mecanismos como la pérdida de especies clave (Pimentel y Harvey 1999).

En síntesis, la búsqueda de la capacidad de automantenimiento de los ecosistemas restaurados derivados de la minería a cielo abierto se fundamentaría en el diseño de formas de relieve estables, un suelo biológicamente funcional, y comunidades vegetales productivas con un ciclo de nutrientes activo y un auto-reemplazamiento de especies a lo largo del tiempo. Por ello, la reconstrucción del relieve ha de hacerse de forma integrada con los otros compartimentos a fin de optimizar el suministro de agua y nutrientes, controlar la explotación abiótica que supone la erosión y favorecer la heterogeneidad de hábitats.

No obstante, todavía no existe un protocolo completo para el diseño integrado de la restauración de ecosistemas, mediante el uso de modelos que formalicen las interacciones clave y permitan predecir la estabilidad de los ecosistemas. Una primera aproximación se ha desarrollado en la restauración de la minería de carbón a cielo abierto en Teruel (MFUSA 2001; Nicolau 2001). El diseño de un protocolo de restauración que optimice el desarrollo de la vegetación frente a la erosión consta de los siguientes pasos: 1. Puesta a punto de modelo RUSLE 1.06 para realizar estimaciones de la tasa de erosión. 2. Determinar la tasa de erosión máxima tolerable por la comunidad herbácea. 3. Aplicación de RUSLE 1.06 para determinar la magnitud de la macro (LS) y microtopografía (altura de los surcos) y seleccionar el tipo de sustrato que da una tasa de erosión por debajo del umbral tolerable. El punto más débil es la asignación de un valor de erosión máxima tolerable, que ha sido establecido a partir de la opinión de expertos. Esta aproximación, aunque tiene un indudable interés en la práctica, presenta importantes lagunas conceptuales. De hecho, deben desarrollarse modelos ecológicos que asuman relaciones no lineales entre vegetación y erosión e incorporen los mecanismos de retroalimentación que operan entre ambos (Puigdefábregas 1996).

La profundización en esta línea se vislumbra como una vía de enormes posibilidades para diseñar restauraciones integradoras de los tres compartimentos básicos de los ecosistemas.

3. Modelos conceptuales de relieves artificiales

La conformación del relieve es, con mucho, el apartado más caro de las restauraciones con movimiento de tierras, por lo que garantizar su estabilidad a largo plazo ha sido objetivo prioritario, también desde el punto de vista de la operatividad de la actividad minera o de ingeniería (Evans 1997). La restauración de la topografía ha evolucionado notablemente en las últimas décadas, habiéndose elaborado modelos conceptuales de relieve cada vez más capaces de albergar ecosistemas funcionales que puedan ser objeto de diversos usos. Cualquier modelo de reconstrucción topográfica ha de basarse en los principios de la geomorfología y ha de tener en cuenta los condicionantes técnicos y económicos que imponen la propia actividad minera o de ingeniería civil y los derivados del clima y de la geología del entorno.

En este apartado se apuntan los principales conceptos teóricos a considerar en la restitución topográfica y se exponen los principales condicionantes de esta práctica. Finalmente se muestran los principales modelos conceptuales de relieves artificiales que se han elaborado.

3.1. Bases geomorfológicas para la construcción de las formas de relieve

Las principales contribuciones teóricas desde la ciencia de la geomorfología al diseño de formas de relieve se deben al profesor T. Toy, y están recogidas en el ya clásico *Geomorphology of Disturbed Lands* (Toy y Hadley 1987). Bajo el paradigma mecanicista, Toy postula que el objetivo es re-establecer un equilibrio entre formas y procesos, lo cual implica conseguir, a su vez, el equilibrio entre las fuerzas erosivas que actúan en la superficie del suelo (flujo hídrico) y las fuerzas de resistencia que presenta el mismo (resistencia estructural de los materiales, cohesividad de los depósitos superficiales y efectos de la vegetación). Obviamente, para alcanzar ese equilibrio en los ecosistemas restaurados tiene que transcurrir el tiempo necesario para que se genere una efectiva cubierta vegetal y una red de raíces, se desarrolle una estructura edáfica y las formas de laderas y canales se vayan ajustando. Desde un punto de vista más práctico, Toy y Black (2000) proponen como objetivos generales de la reconstrucción topográfica:

- Creación de plataformas estables, no sujetas a movimientos de masa.
- Gestión del agua para controlar la erosión y favorecer el desarrollo de la vegetación: En las regiones húmedas se requiere el control de las escorrentías externas que entran en la zona restaurada (*runon*) e internas (*runoff*) para regular la erosión y la calidad del agua. En las zonas secas se trata de optimizar las prácticas de conservación de agua: formas de relieve que recojan y distribuyan el agua; manipulación de la superficie para mejorar la infiltración in-situ y *mulching* para reducir la evaporación.
- Minimización del coste de mantenimiento a largo plazo del relieve.
- Favorecimiento de la heterogeneidad de hábitats para la vida silvestre.

3.2. Condicionantes para la construcción de la topografía

Entre los condicionantes principales de la construcción del relieve se encuentran el alto grado de dependencia respecto a la dinámica de la propia actividad minera o ingenieril (la disponibilidad y ubicación de materiales depende del ritmo de la obra), así como las restricciones que imponen el clima y la morfología del relieve original sobre el que se construye el nuevo (no es lo mismo construir un relieve sobre un fondo de valle que sobre una ladera) y los ecosistemas del entorno (Toy y Black 2000).

En efecto, las características del clima determinan normalmente el calendario de los trabajos de restauración, y condicionan la gestión del agua y del control de la erosión a llevar a cabo. El coste económico de la reconstrucción topográfica depende directamente de la topografía original: Las superficies suaves pueden requerir la importación de materiales para relleno, en tanto que las abruptas e irregulares exigen costosas operaciones de movimiento de tierras.

En relación a los ecosistemas del entorno, la topografía adyacente impone las condiciones más limitantes para el diseño y a menudo constituye la principal consideración en el proceso de planificación. Entre otras cosas, ésta influye sobre la gestión de las aguas (propias y de las externas que atraviesan la zona restaurada), resultando especialmente críticos los cursos de agua.

3.3. El modelo de plataforma-berma-talud

Las primeras experiencias de restitución de relieve tenían como objetivo alcanzar la estabilidad geotécnica de las nuevas formas, evitando movimientos en masa y las consecuencias de los posibles accidentes derivados. Ello dio lugar a un modelo de relieve en escombreras en forma de pirámide truncada, de laderas rectilíneas y abruptas (taludes de 30°), drenaje a base de cunetas, todo ello sobrepuesto en el paisaje natural. Este modelo se ha denominado como modelo plataforma-berma-talud (**Figura 1**). Esta topografía inmadura no es capaz de albergar ecosistemas funcionales donde desarrollar usos agrarios o naturales debido a su escasa capacidad de retención de agua y a la intensa erosión hídrica superficial a la que se ve sometida. Por otro lado, las altas tasas de sedimentos y escorrentía que se emiten a los cauces naturales ocasionan un intenso impacto ambiental. Es decir, es una solución estable geotécnicamente, pero no ecológicamente. Posteriormente este modelo ha ido evolucionando, suavizando las pendientes de los taludes e incorporando sustratos favorecedores de la vegetación, aunque se trata de una aproximación con grandes limitaciones de base y conceptualmente obsoleta hoy en día, que sin embargo todavía se sigue practicando ampliamente en España.

Estas formas alejadas del equilibrio tienden hacia el mismo mediante procesos de erosión intensos, entre los que dominan la reguerización de los taludes sobre superficies compactadas con bajos niveles de cobertura vegetal. Se han llegado a alcanzar tasas de erosión de hasta 507 t/ha/año (Porta *et al.* 1989); con el abarrancamiento por deficiente funcionamiento de las bermas o terrazas en los eventos máximos (Sawatski *et al.* 2000); y una erosión laminar intensa (Sánchez y Wood 1989). La erosión está más limitada por la disponibilidad de sedimentos para ser transportados que por la capacidad de transporte del medio, que es muy elevada (*weathering-limited* más que *transport-limited*; Haigh 1985).

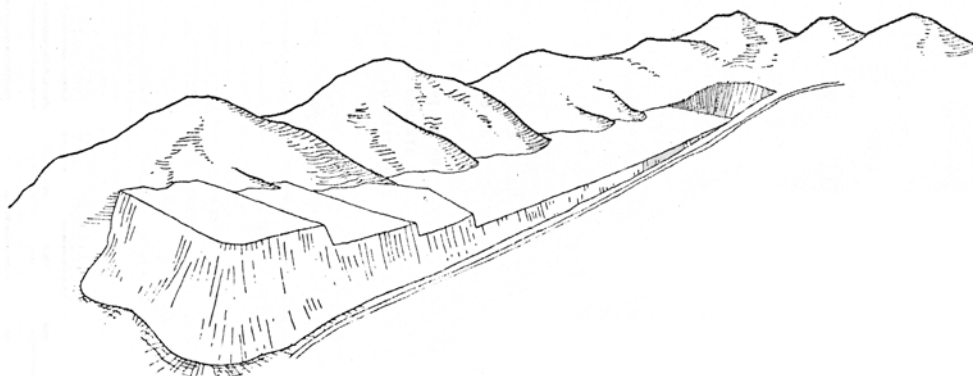


Figura 1: Esquema de la morfología final de una restauración minera según el modelo plataforma-berma-talud.

3.4. El modelo de imitación del relieve original

La legislación estadounidense de restauración minera (Surface Mining Control and Reclamation Act, SMCRA) de 1977 se inclina por la restitución de la topografía original. Este planteamiento no es compartido por la mayoría de la comunidad científica, según recogen Toy y Black en su obra ya citada. Brenner (1995) señala que, con frecuencia, las laderas resultantes de la reproducción de las originales son excesivamente largas y compactadas por la maquinaria, por lo que presentan

dificultades de revegetación, y afirma que la estabilidad en los materiales no consolidados es diferente que en los originales. Bell *et al.* (1989), en los Apalaches, también registraron inestabilidad por intensa erosión debido a la falta de equilibrio entre las formas de relieve y la consistencia de los materiales, dado que éstos eran más lábiles y erosionables que los originales tras su extracción y deposición. Consideran que no es una práctica recomendable en topografías abruptas.

En nuestro país, solamente las restauraciones realizadas en áreas de topografía suave, como fondos de vaguada, tienden a aproximarse a las formas de relieve originales.

3.5. La cuenca hidrológica como unidad de restitución del relieve

La aproximación con mayor base científica es tomar la cuenca hidrológica como unidad natural de construcción del relieve artificial, basándose en los principios básicos de la geomorfología e hidrología. El relieve se organiza a partir de cuencas hidrológicas individualizadas compuestas por laderas y cauces y con estructuras de seguridad para prevenir los efectos destructivos de los eventos extremos (**Fotos 53 y 54**). Los elementos que hay que manejar son la superficie que se da a la cuenca, la densidad y el patrón de la red de drenaje, la morfología de las laderas y de los canales, y las medidas estructurales de control de la escorrentía y sedimentos (trampas de sedimentos, balsas reguladoras, sistemas de protección de cauces, etc).

Enfoques

Para la construcción de relieves maduros, con una dinámica de funcionamiento natural, se han propuesto dos aproximaciones. Por un lado, el estudio comparativo de paisajes naturales del entorno, determinando los rangos de pendiente, longitud y convexidad en que se mantienen estables las formas de relieve naturales, con el fin de reproducir sus formas, densidad de la red de drenaje, etc. Ello exige que las características hidrológicas y erosivas del nuevo paisaje sean similares a las de los naturales, lo que sucede si es posible restituir los suelos naturales y la revegetación se produce de forma rápida. Entre los trabajos más minuciosos se encuentra el realizado por Riley (1995) en ambiente tropical en Australia, para garantizar la máxima estabilidad del relieve de restauración de una mina de uranio a fin de conformar una morfología en la que no se pudieran desarrollar regueros y/o barranqueras por razones de seguridad.

La otra alternativa, en el caso de que el manejo del suelo y la revegetación no permitan reproducir las características hidrológicas y erosivas de los paisajes naturales, es diseñar un relieve nuevo que disponga de líneas de seguridad, para prevenir los efectos de eventos extremos, especialmente en los primeros estadios de la sucesión, mientras el suelo y la comunidad vegetal se van desarrollando. Entre estos “cortafuegos” de seguridad los más comunes son las balsas que actúan como trampas de sedimentos (Sawatski *et al.* 2000). La estabilidad del relieve se comprueba mediante modelos hidrológicos y de erosión.

Laderas

Para Sawatski, una topografía madura se debe caracterizar por laderas relativamente cortas y de pendiente más suave conforme el flujo de escorrentía se concentra hacia abajo, con líneas de flujo bien definidas en cauces suficientemente profundos para evacuar los caudales máximos. En vez de laderas uniformes, una topografía madura tiene laderas heterogéneas con colinas y valles que, además de mejorar el aspecto estético, proporcionan una variedad más amplia de hábitats a la fauna y evitan las elevadas tasas de escorrentía de las típicas laderas rectilíneas y largas.

Los trabajos de Haigh (1979, 1980, 1985) en relación a la evolución del perfil longitudinal de laderas artificiales fueron claves para establecer los criterios de diseño. Haigh identifica el perfil sigmoidal (convexo-rectilíneo-cóncavo) como el más estable, encuentra una influencia significativa de la orientación pero no de la vegetación en la evolución del perfil, e identifica como importante factor de control la dinámica a que se ve sometida el nivel de base de la ladera: deposición o erosión a pie de ladera, frecuentemente causada esta última por la existencia de cunetas.

La respuesta hidrológica de las laderas restauradas en ambientes mediterráneo-continetales ha sido descrita por Nicolau (2002), quien ha caracterizado los controles bióticos y abióticos en la generación de la escorrentía y su flujo superficial en laderas con sustrato de tierra vegetal y de estéril. En las primeras, las comunidades de herbáceas juegan un importante papel hidrológico, favoreciendo la capacidad de infiltración del suelo y proporcionando una respuesta más homogénea a lo largo del año comparada con la del estéril. La continuidad espacial de la escorrentía desde las áreas de interregueros hasta el desagüe de la red de regueros organizada en la ladera, es muy baja y viene controlada principalmente por la magnitud de la precipitación y la humedad del suelo. La respuesta hidrológica del sustrato de tierra vegetal es compatible con el desarrollo de la vegetación. El sustrato de estéril desarrolla una costra superficial que reduce en gran medida la capacidad de infiltración, lo que conduce a la formación de una densa red de regueros en la ladera. La circulación de la escorrentía ladera abajo depende de la variación espacial y estacional de la costra en las áreas de interregueros, donde la reinfiltración tiene lugar. La intensa erosión laminar y en regueros, junto con la baja disponibilidad de agua para las plantas en el suelo, restringen el desarrollo de la vegetación.

Osterkamp y Joseph (2000) advierten de las diferencias en el tipo de flujo hídrico según el grado de concavidad-convexidad de las laderas: convergente en las cóncavas, paralelo en las rectas y divergente en las convexas. Las implicaciones prácticas que ello tiene para su construcción es explicado con detalle por Toy y Black (2000) quienes indican que las laderas cóncavas de las cabeceras de las cuencas y las convexas presentan mayores dificultades de construcción que las rectas, por la mayor dificultad de desplazamiento de la maquinaria. Por otro lado, las de cabecera requieren un control cuidadoso de las escorrentías y de la descarga sub-superficial, en tanto que las convexas son más inestables que las rectas. Aquellas, al dispersar el flujo de agua, son las formas de relieve más secas. Finalmente, estos autores señalan la necesidad de tener en cuenta dos tipos de movimientos verticales que sufren los materiales que conforman los relieves artificiales tras ser depositados: el asentamiento (movimiento causado por la reducción de los espacios vacíos entre las partículas debido a la compresión que experimentan) y la subsidencia (movimiento causado por la eluviación de partículas finas hacia los poros de mayor tamaño entre las partículas gruesas).

Cauces

La construcción de los cauces se inspira menos en el conocimiento disponible sobre los sistemas naturales que la construcción de las laderas, y normalmente se hace siguiendo más bien criterios de ingeniería que geomorfológicos. Los cauces han de cumplir la misión de trasladar el agua superficial de un punto a otro sin provocar excesiva erosión o daños aguas abajo y minimizando la saturación de los materiales infrayacentes para evitar inundaciones. Para ello los cauces deben imitar la morfología natural en cuanto a profundidad, pendiente, anchura, sinuosidad y longitud de la onda de los meandros (Stiller *et al.* 1980) y deben incorporar bloques rocosos enterrados y llanuras de inundación para atenuar los efectos de las crecidas.

3.6. La solución “Utrillas”

En el marco de la cuenca hidrológica como unidad constructiva del relieve, tiene interés presentar la solución aportada por la empresa Minas y Ferrocarril de Utrillas, S.A. en la restauración de sus explotaciones de carbón a cielo abierto en Teruel por haberse revelado como eficaz en un ambiente tan difícil desde el punto de vista ecológico como el mediterráneo-continental (Minas y Ferrocarril de Utrillas 2001).

El modelo conceptual se basa en la compartimentación de las áreas restauradas, dividiéndose en cuencas hidrológicas independientes, con una gran capacidad de almacenar y regular en sí mismas la escorrentía procedente de la precipitación pluvial. Estas cuencas se hallan conectadas con la red de drenaje natural, recibiendo caudales de los barrancos situados aguas arriba y vertiéndolos aguas abajo en los eventos extremos, tras ser regulados internamente en los antiguos huecos de explotación, restaurados como embalses que actúan como estructura de seguridad que amortigua los picos de crecida y retiene sedimentos. Por otro lado, la restauración de estos embalses como zonas húmedas incrementa el valor ecológico y paisajístico de la restauración.

Como cualquier cuenca hidrológica, sus dos elementos básicos son las vertientes y la red de drenaje. En las vertientes se incluyen las laderas artificiales de diversos tipos, las plataformas horizontales y las pistas de acceso, aunque éstas también funcionan como parte de la red de drenaje. Ésta está constituida por pequeñas balsas de regulación a la entrada de los barrancos naturales y de los manantiales en el área restaurada, balsas de regulación intermedias y embalses finales de regulación, situados en el extremo de la red de drenaje artificial, antes de su conexión con la red natural aguas abajo. Cunetas y cauces, con distintos sistemas de amortiguación de la energía del flujo hídrico, conectan las balsas.

Este sistema se ha revelado eficaz para el control de las escorrentías internas, evitándose las afecciones de las tormentas sobre los cauces naturales situados aguas abajo. Asimismo, las laderas artificiales se mantienen estables y guardan la humedad necesaria para el desarrollo de la vegetación. En efecto, las tasas de erosión registradas se sitúan entre 0.65 y 11.1 t/ha/año, y la cobertura vegetal de la comunidad de herbáceas a los cinco años entre 37-86%. Sin embargo, no se ha resuelto todavía el diseño de los cauces, excesivamente estructural, por lo que sufren los efectos destructivos de los eventos pluviales intensos.

La construcción de las laderas artificiales presenta las siguientes características:

- Pendiente entre 18° y 21°.
- Aislamiento de la ladera de las escorrentías procedentes de las plataformas, pistas, o de las bermas superiores.
- Extendido de una capa de tierra vegetal de unos 50 cm. de espesor.
- Labrado transversal a la pendiente. Labor profunda.
- Aplicación de purines.
- Labrado para evitar los olores de los purines.
- Siembra de la mezcla de herbáceas a finales de febrero tras el frío invernal.
- Labor superficial para el enterramiento de las semillas.
- Plantación de vegetación leñosa dos años después, en febrero.

La mezcla de herbáceas está compuesta por las siguientes especies: *Lolium perenne*, *Bromus catharticus*, *Festuca arundinacea*, *Medicago sativa* (alfalfa), *Onobrichys sativa* (esparceta), y *Melilotus officinalis*. La plantación de especies leñosas se ha realizado por tres métodos: ahoyado al tresbolillo, en surcos de labrado profundo (con volteo de la tierra) y en incisiones transversales de 40-50 cm de profundidad a 2 m de distancia, siendo este último el sistema más general. Las

especies utilizadas son numerosas, aunque las principales son: *Pinus halepensis* (pino carrasco), *Pinus nigra* (pino laricio), *Quercus ilex ssp. rotundifolia* (encina carrasca) y *Quercus faginea* (quejigo).

4. El uso de modelos matemáticos para el diseño de los relieves

La mayoría de las empresas que en Europa realizan restauraciones que incluyen movimiento de tierras construyen los relieves mediante aproximaciones empíricas, de ensayo y error, sin disponer de predicciones previas acerca del comportamiento de tales relieves ante los eventos pluviales. Sin embargo, como afirma Evans (1997) en referencia a las restauraciones mineras, “*para incorporar con éxito el diseño de las formas de relieve hay que poder predecir la estabilidad de las formas de relieve finales, lo cual implica la aplicación de modelos hidrológicos y de erosión*”.

Los modelos hidrológicos y de erosión existentes fueron desarrollados para suelos agrícolas o naturales. Esto, aunque no tendría que suponer un problema fundamental, hace que en la práctica no resulten óptimos para los paisajes artificiales (Willgoose y Riley 1994). Estos autores indican dos limitaciones principales en la aplicación de los modelos convencionales a las restauraciones mineras y de la ingeniería civil.

1. Se desarrollaron para valorar la erosión en geoformas (laderas, cuencas) fijas, por lo que no permiten una modificación fácil de la geoforma en el proceso interactivo del diseño de las formas. La forma de las laderas y las cuencas han de ser laboriosamente determinadas, por lo que serían necesarios modelos más ágiles y flexibles para el diseño de los relieves finales.
2. La agregación, el particulado del material superficial es diferente en los suelos agrícolas y naturales que en los restaurados. Los suelos agrícolas y naturales han estado sujetos históricamente a los procesos de alteración, clasificación y transporte, y están en equilibrio con el clima. Los sustratos de las restauraciones mineras están inalterados, sus partículas pobremente clasificadas y no se encuentran en equilibrio con las condiciones climáticas. Esto supone un grave problema a la hora de asignar valores a los parámetros de los modelos, pues no se corresponden con los de los suelos naturales que figuran en las tablas de valores.

En consecuencia, dichos autores recomiendan la elaboración de modelos específicos para el diseño de los relieves derivados de la minería e ingeniería.

4.1. Modelos disponibles

Hay dos grandes categorías de modelos de erosión: los que predicen la pérdida de suelo (*soil loss prediction models*) y los que predicen la evolución de la topografía (*topographic evolution models*). Los primeros tienen la limitación de que no predicen la sedimentación. Los segundos son recomendables en restauración porque, por un lado, su utilidad para comprobar la evolución de las formas a largo plazo es indudable y, por otro, la dificultad que presentan al requerir los valores de la cota topográfica de los puntos de la superficie a diseñar no es tal en minería e ingeniería civil, donde dichos datos suelen estar disponibles. Sin embargo, sólo hay un modelo de este tipo disponible para restauraciones mineras, y se encuentra en fase experimental. Se trata del modelo SIBERIA, desarrollado en Australia en la universidad de Newcastle, por el equipo del profesor G. Willgoose. Ha sido ya testado en el ámbito experimental y se encuentra en fase de adaptación para su uso comercial por parte de las empresas mineras (Hancock *et al.* 2000). Su mayor limitación es el elevado número de parámetros de entrada que requiere para ser aplicado.

En la práctica habitual, las empresas aplican modelos predictivos de pérdida de suelo y, en concreto, se ha utilizado de forma generalizada la USLE (*Universal Soil Loss Equation*), modelo empírico con reconocidas limitaciones conceptuales. En las décadas pasadas numerosos trabajos experimentales se centraron en adaptar este modelo –desarrollado para suelos agrícolas– a suelos restaurados, para mejorar su precisión. Destaca el ajuste de Schroeder (1995) para la vegetación, y el de Barfield *et al.* (1979) para la erodibilidad del suelo. Recientemente se ha desarrollado una nueva versión específica de la RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) para áreas artificiales (minería, carreteras, etc.): “Rusle for mined lands, constructed sites and reclaimed lands” (Toy y Foster 1998). La última versión data de enero de 2001 y es de adquisición gratuita en la dirección: <http://sedlab.olemiss/rusle>. Aunque sigue siendo un modelo empírico, conceptualmente avanza en cuanto al papel de la vegetación en subprocesos como la infiltración y la erodibilidad del suelo. Kapolka y Dollhopf (2001) han detectado la tendencia de RUSLE 1.06 a subestimar la tasa de erosión en laderas con regueros, y han desarrollado un método para mejorar la estimación del factor K que considera la susceptibilidad del suelo a la formación de regueros. También Abel *et al.* (2000) llegan a la misma conclusión en laderas artificiales intensamente reguerezadas en minas de lignito en Alemania. Nicolau (2001), en ambiente Mediterráneo-continental, ha encontrado una capacidad de predicción satisfactoria, excepto también en laderas donde se desarrollan regueros, en las que el modelo subestima las tasas de erosión. Otros autores, como Evans y Loch (1996) encontraron un buen ajuste en experimentos con lluvia artificial. Kelsey (2002), aplicando RUSLE a escala de evento pluvial individual con lluvia simulada, encuentra sobre-estimación de la pérdida de suelo tanto para la erosión en regueros (en suelo desnudo) como laminar (suelo cubierto por mantas orgánicas) en suelos franco arcillo limosos; y subestimación en suelos franco arenosos desprovistos de vegetación, aunque no estadísticamente significativa.

La necesidad de manejar las escorrentías ha llevado a aplicar de forma combinada modelos de erosión e hidrológicos. Lo más habitual ha sido combinar el sencillo modelo hidrológico del Número de Curva con la USLE o RUSLE para obtener una predicción del volumen de escorrentía y de la pérdida de suelo (Barfield *et al.* 1979; Rojiani *et al.* 1984). Como ya se ha indicado, Fifield (1994; 2000) ha elaborado un programa informático comercial “*Evaluating the effectiveness of erosion and sediment control plans*” para la elaboración de planes de control de la erosión en áreas de origen antrópico que es una adaptación de la MUSLE.

En esta línea se ha desarrollado en Australia otra metodología para el diseño de relieves en minería que combina el método del Número de Curva para la hidrología, la RUSLE-MUSLE para los sedimentos y el GRASP, modelo sobre el crecimiento de la vegetación herbácea (Loch, 1997; Loch y Sell, 1998). Esta metodología, fruto de un proyecto en el que colaboraron universidades, administración minera y medioambiental y empresas privadas, ha sido desarrollada específicamente para la restauración de áreas mineras, e incluye la dinámica de la vegetación de forma explícita, lo que supone un avance en la formalización de las relaciones entre los elementos bióticos y abióticos del ecosistema.

Otros intentos que ha habido de desarrollar modelos predictivos de la erosión para las restauraciones mineras no han tenido éxito, no tanto por su falta de precisión, sino por la complejidad de uso en comparación con la USLE y derivados. Este es el caso del modelo desarrollado por Khanbilvardi y Rogowski (1986) para la EPA (Environmental Protection Agency) a partir de la USLE, que predecía la tasa de erosión, así como la formación de regueros y canales, considerando áreas cóncavas y convexas, y también teniendo en cuenta la vegetación.

5. Conclusiones

La conformación del relieve constituye la primera actividad sobre la que se fundamenta el éxito de cualquier proyecto de restauración con movimiento de tierras. Su integración, siguiendo criterios ecológicos, con la restauración de los otros compartimentos, suelo y vegetación, es un requisito necesario.

El conocimiento científico que la geomorfología ha desarrollado sobre los relieves naturales ha permitido elaborar un modelo conceptual de relieve (basado en la cuenca hidrológica) y desarrollar herramientas para su diseño y verificación (modelos de erosión e hidrología) que hoy en día están disponibles para las empresas y la administración con suficientes garantías de éxito. No obstante, a nivel teórico queda aún un camino por recorrer para integrar de forma más ecosistémica y menos mecanicista los tres compartimentos básicos del ecosistema a restaurar. Esto es especialmente relevante para evaluar la respuesta de los ecosistemas restaurados a los eventos extremos (lluvias y/o sequías).

Desafortunadamente, en España y en la mayor parte de países europeos, la conformación del relieve aún sigue de forma generalizada el modelo obsoleto plataforma-berma-talud. Y su diseño se realiza más a partir de la experiencia práctica adquirida *in situ* al cabo de los años que mediante la aplicación de modelos predictivos. Esta falta de actualización tanto conceptual como técnica, es una de las razones que explican los numerosos fracasos en la restauración de ecosistemas degradados por movimientos de tierras.

Sin duda, es necesario un seguimiento por parte de la administración de la evolución de los ecosistemas restaurados, basado en el registro y muestreo de variables bióticas y abióticas. Asimismo, es preciso que la sociedad adquiera una mayor conciencia sobre el valor de los bienes y servicios ambientales que mediante la restauración se quieren conservar y restituir, los cuales resultan imprescindibles para mantener el nivel de bienestar de que gozamos.

Bibliografía

- Abel, A., Michael, A., Zartl, A. and Werner, F. 2000. Impact of erosion-transported overburden dump materials on water quality in Lake Cospuden evolved from a former open cast lignite mine south of Leipzig, Germany. *Environmental Geology* **39** (6): 683-688.
- Beeby, A. 1993. *Applying Ecology*. Chapman y Hall, London, 441 pp.
- Bell, J.C., Daniels, W.L., and Zipper, C.E. 1989. The practice of "approximate original contour" in the Central Appalachians. I. Slope Stability and erosion potential. *Landscape Urban Planning* **18**: 127-138.
- Bender, M.J., Sawatski, L., Long, D. and Anderson, P.G. 2000. A Strategy for Determining Acceptable Sediment Yield for Reclaimed Mine Lands. In: M. Haigh (ed): *Reclaimed Land. Erosion Control, Soils and Ecology*. Balkema, pp 37-50.
- Bradshaw, A. 1988. Alternative Endpoints for Reclamation. In: J. Cairns, Jr (ed.), *Rehabilitating Damaged Ecosystems*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp: 69-85.
- Brenner, F.J. 1985. Land reclamation after strip coal mining in the United States. *Mining Magazine*. September, pp: 211-217.
- Carpenter, S.R. 1998. Ecosystem Ecology. In: Dodson, S., Allen, T., Carpenter, S., Ives, A., Jeanne, R. Kitchell, J., Langston, N. and Turner, M. *Ecology* 123-162. Oxford University Press.
- Ehrenfeld, J.G. 2000. Defining the limits of restoration: The need of realistic goals. *Restoration Ecology* **8** (1): 2-9.

- Evans, K.G. 1997. *In Runoff and erosion characteristics of a post-mining rehabilitated landform at Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia and the implications for its topographic evolution*. Unpublished Doctoral Thesis. University of Newcastle. Dep. of Civil, Surveying and Environmental Engineering; 3.7
- Evans, K. 2000. Methods for assessing mine site rehabilitation design for erosion impact. *Australian Journal of Soil Research* **38**: 231-247.
- Evans, K.G. and Loch, R.J. 1996. Using the RUSLE to Identify Factors Controlling Erosion Rates of Mine Soils. *Land Degradation y Development* **7**: 267-277.
- Fifield, J.S. 1994. Evaluating the Effectiveness of Erosion and Sediment Control Plans. Course notes. Technical Workshop for The International Land Reclamation and Mine Drainage Conference. Pittsburgh, April 24-29, 1994.
- Gómez Sal, A. y Nicolau, J.M. 1999. Hacia una caracterización ecológica de los paisajes degradados. Bases para su restauración. En: González Alonso, S. (ed.) Libro homenaje a D. Angel Ramos: 629-639. E.T.S.I Montes. Madrid.
- Haigh, M.J. 1980. Slope retreat and gullyng on revegetated surface-mine dumps, Waun Hoscyn, Gwent. *Earth Surface Processes* **5**: 77-79.
- Haigh, M.J. 1979. Ground retreat and slope evolution on regraded surface-mine dumps, Waunafon, Gwent. *Earth Surface Processes* **4**: 183-189.
- Haigh, M.J. 1985. The experimental examination of hill-slope evolution and the reclamation of land disturbed by coal mining. In: Johnson, J.H. (Ed.), *Geography applied to practical problems*. Geo Books, Norwich, UK, pp: 123-138.
- Haigh, M.J. 1992. Problems in the reclamation of coal-mine disturbed lands in Wales. *International Journal of Surface Mining and Reclamation* **6**: 31-37
- Haigh, M.J. 2000. Erosion control: Principles and some technical options. In *Reclaimed Land: Erosion Control, Soils and Ecology*, Haigh, M. J. (ed). A.A. Balkema: Rotterdam; 75-110.
- Hancock, G.R., Evans, K.G., Willgoose, G.R., Moliere, D.R., Saynor, M.J. and Loch, R.J. 2000. Medium-term erosion simulation of an abandoned mine site using the SIBERIA landscape evolution model. *Australian Journal of Soil Research* **38**: 249-263.
- Kapolka, N.M. and Dollhopf, D.J. 2001. Effect of Slope Gradient and Plant Growth on Soil Loss on Reconstructed Steep Slopes. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* **15** (2): 86-99.
- Kelsey, K. 2002. Use of the Revised Universal Soil Loss Equation on an Event-by-Event Basis. *International Erosion Control Association Proc.* **33**: 61-69.
- Khanbilvardi, R.M. and Rogowski, A. S. 1986. Modeling soil erosion, transport and deposition. *Ecological Modelling* **33**: 255-268.
- Loch, R.J. 1997. Landform design – Better outcomes and reduced costs applying science to above- and below-ground issues. *Proceedings of the 22nd Annual environmental Workshop*. Minerals Council of Australia: 550-563.
- Loch, R.J. and Sell, K. 1998. Cost savings and improved management of rehabilitated slopes: benefits form a rainfall simulator study at the northparkes mine. In: M. Sivakumar y R.N. Chowdhury (Eds), *Environmental Management, 2. Proceedings of the Second International Conference on Environmental Management*. Elsevier, pp: 1187-1194.
- Margalef, R. 1968. *Perspectives of the Ecological Theory*. Univ Chicago: Chicago; 40 pp.
- Minas y Ferrocarril de Utrillas, S.A. 2001. Diseño de la morfología y red de drenaje en las restauraciones mineras. Ocicarbón-Ciemat. Informe de difusión de proyectos nº 74. 36 pp.
- Nicolau, J.M. 1996. Effects of topsoiling on erosion rates and processes in coal-mine spoil banks in Utrillas, Teruel, Spain. *Int. J. Surface mining Reclamation and Environment* **10**: 73-78.
- Nicolau, J.M. and Asensio, E. 2000. Rainfall erosion on opencast coal-mine lands: Ecological perspective. In *Reclaimed Land: Erosion Control, Soils and Ecology*, Haigh, M. J. (ed). A.A. Balkema: Rotterdam; 51-73.

- Nicolau, J.M. 2001. Using RUSLE 1.06 to design landforms derived from opencast coal mining reclamation. Proceedings of the International Conference on sanation and remediation of post-mining landscapes. CD-ROM format. Teplice, Czech Republic.
- Nicolau, J.M. 2002. Runoff generation and routing on artificial slopes in a Mediterranean-continental environment: The Teruel coalfield, Spain. *Hydrological Processes* **16**: 631-647.
- Osterkamp, W.R. and Joseph, W.L. 2000. Climatic and hydrologic factors associated with reclamation. In: Barnhisel, R., Darmody, R. and Daniels, W. (eds): *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. American Society of Agronomy, No 41, pp 193-216.
- Palmer, J. 1992. Nutrient Cycling: Key to Reclamation Success. In: Chambers, J. y Wade, J. (eds): *Evaluating Reclamation Success: The Ecological Consideration*: 27-36. USDA, General Technical Report EN-164.
- Pimentel, D. and Harvey, C. 1999. Ecological effects of erosion. In: L.R. Walker (Ed): *Ecosystems of Disturbed Ground*: 123-136. *Ecosystems of the World*, 16, Elsevier.
- Porta, J., Poch, R. y Boixadera, J. 1989. Land evaluation and erosion practices on mined soils in EN Spain. *Soil Technology series* **1**: 189-206.
- Puigdefábregas, J. 1996. El papel de la vegetación en la conservación del suelo en ambientes semiáridos. In: Lasanta, T. y García-Ruiz, J.M. (eds): *Erosión y recuperación de tierras en áreas marginales*: 79-98. Sociedad Española de Geomorfología, Zaragoza.
- Riley, S.J. 1995. Geomorphic estimates of the stability of a uranium mill tailings containment cover: Nabarlek, Northern Territory, Australia. *Land Degradation y Rehabilitation* **6**: 1-16.
- Rojiani, K. B., Tarbell, K.A., Shanholtz, Woeste, F.E. 1984. Probabilistic Modeling of Soil Loss from Surface Mined Regions. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **27** (6): 1798-1804.
- Sanchez, Ch. E. and Wood, M.K. 1989. Infiltration rates and erosion associated with reclaimed coal mine spoils in West Central New Mexico. *Landscape and Urban Planning* **17**: 151-168.
- Sawatski, L., McKenna, G., Keys, M.J. and Long, D. 2000. Towards minimising the long-term liability of reclaimed mine sites. In *Reclaimed Land: Erosion Control, Soils and Ecology*, Haigh, M. J. (ed). A.A. Balkema: Rotterdam; 21-36.
- Schroeder, S.A. 1987. Runoff curve number estimations for reshaped fine-textured spoils. *Reclamation and Revegetation Research* **6**: 129-136.
- Stiller, D.M., Zimpfer, G.L. and Bishop, M. 1980. Application of geomorphic principles to surface mine reclamation in the semiarid West. *Journal of Soil and Water Conservation* **35** (6): 274-277.
- Toy, T.J. and Hadley, R.F. (1987) *Geomorphology of Disturbed Lands*. Academic Press Inc. 255 pp.
- Toy, T.J. and Foster, G.R. 1998. Guidelines for the Use of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) version 1.06 on Mined Lands, Construction Sites and Reclaimed Lands. Office of Surface Mining, Denver, USA.
- Toy, T. J. and Black, J.P. 2000. Topographic reconstruction: The theory and practice. In: Barnhisel, R., Darmody, R. and Daniels, W. (eds): *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. American Society of Agronomy, No 41, pp 41-76.
- Willgoose, G. and Riley, S. 1994. Long-Term Erosional Stability of Mine Spoils. The AusIMM Annual Conference: 423-427. Darwin, Australia, 5-9 August 1994.
- Willgoose, G. and Riley, S. 1998. The Long-term Stability of Engineered Landforms of the Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia: Application of a Catchment Evolution Model. *Earth Surface Processes and Landforms* **23**: 237-259.