



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**Anàlisi mitjançant modelització
integrada hidràulic-hidrològica de
l'estabilitat de solucions de
restauració geomorfològica
dissenyades amb el mètode
GeoFluv**

Treball realitzat per:
Marta Sainz Blanco

Dirigit per:
Ernest Bladé Castellet

Màster en:
Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, gener 2023

Departament d'Enginyeria civil i ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

ANÀLISI MITJANÇANT MODELITZACIÓ INTEGRADA HIDRÀULIC-HIDROLÒGICA DE
L'ESTABILITAT DE SOLUCIONS DE RESTAURACIÓ GEOMORFOLÒGICA DISSENYADES
AMB EL MÈTODE GEOFLUV

Autora: Marta Sainz Blanco

Tutor: Ernest Bladé Castellet

RESUM

Paraules clau: restauració geomorfològica, Parc Natural Alto Tajo, restauració de mines, erosió de sòls, Iber

Les restauracions geomorfològiques són una tècnica força nova per a la restauració de mines a cel obert, amb un objectiu molt clar d'estabilitat davant l'erosió a llarg termini. Resulta de gran interès combinar l'ús de mètodes i softwares usats per generar dissenys de restauracions d'aquest tipus, com podria ser el Geofluv - Natural Regrade, amb models d'erosió del sòl que ajudarien a assegurar que les solucions dissenyades són estables a llarg termini.

En aquest treball s'estudia la possibilitat de fer servir el model numèric Iber com a complement de Geofluv-Natural Regrade en el disseny de restauracions de mines. Per fer-ho, s'han simulat un total de tres pluges de disseny (de 2, 5 i 100 anys) per veure les tendències erosives d'una restauració feta a la mina del Machorro, al Parc Natural de l'Alto Tajo, i s'han comparat amb les erosions reals de la zona esmentada, calculades a partir de la diferència dels models d'elevació del terreny dels anys 2012 a 2018.

Els mapes d'erosió obtinguts per a les tres pluges mostren una bona aproximació a la realitat del canal principal: les màximes erosions es donen en el seu tram final i a una part del tram central. En canvi, els canals secundaris on l'erosió és menor es troben millor representats amb la pluja de menor període de retorn. Tot i que caldrien estudis més complexos, d'aquesta primera aproximació fet amb Iber es pot concloure que aquest mostra un gran potencial a l'hora d'usar-se com a complement per al disseny de restauracions geomorfològiques.

ANÀLISI MITJANÇANT MODELITZACIÓ INTEGRADA HIDRÀULIC-HIDROLÒGICA DE
L'ESTABILITAT DE SOLUCIONS DE RESTAURACIÓ GEOMORFOLÒGICA DISSENYADES
AMB EL MÈTODE GEOFLUV

Autora: Marta Sainz Blanco

Tutor: Ernest Bladé Castellet

ABSTRACT

Key words: geomorphic reclamation, Alto Tajo Natural Park, mining reclamation, soil erosion, Iber

Geomorphic reclamation is a very new technique for the restoration of open-cut mines, with a very clear objective of long-term stabilisation against erosion. It is of great interest to combine the use of methods and software used to generate restoration designs of this type, such as Geofluv - Natural Regrade, with soil erosion models that would help to ensure that the solutions designed are long-term stable.

This final work studies the possibility of using the Iber numerical model as a complement to Geofluv-Natural Regrade in the design of mine reclamation. To do so, a total of three design rains (of 2, 5 and 100 years of return period) have been simulated to see the erosion trends of a restoration carried out in the Machorro mine, in the Alto Tajo Natural Park, and compared with the real erosion of the area, calculated from the difference in the elevation models of the land from 2012 to 2018.

The erosion maps obtained for the three cases show a good approximation to the reality of the main channel: the maximum erosion occurs in the final section and in part of the central section. In contrast, the secondary channels where erosion is less severe are better represented with the lightest rain. Although more complex studies are needed, it can be concluded from this first approximation made with Iber that it shows great potential for use as a complement to the design of geomorphological restorations.

ÍNDEX

1.	INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS.....	1
1.1	Introducció.....	1
1.2	Objectius.....	2
2.	ESTAT DEL CONEIXEMENT	4
2.1	Restauració de mines.....	4
2.1.1	Mètodes tradicionals	4
2.1.2	Restauracions geomorfològiques i el mètode Geofluc	7
2.2	Estabilitat erosiva.....	12
2.2.1	SIBERIA.....	12
2.2.2	CAESAR	14
2.2.3	GOLEM	15
2.3	Iber	16
2.3.1	Escolament superficial.....	18
2.3.2	Precipitació.....	19
2.3.3	Infiltració	19
2.3.4	Evapotranspiració	20
2.3.5	Percolació.....	20
2.3.6	Flux subsuperficial	20
3.	ZONA D'ESTUDI	21
3.1	Característiques de la zona.....	21
3.1.1	Medi físic.....	21
3.1.2	Flora	22
3.1.3	Fauna.....	23
3.1.4	Geologia i geomorfologia	24
3.1.5	Clima.....	26
3.1.6	Hidrologia	26
3.2	Restauració geomorfològica de la mina	26

3.3	Erosió.....	28
4.	CONSTRUCCIÓ DEL MODEL.....	32
4.1	Definició geomètrica	32
4.1	Infiltració.....	34
4.2	Precipitació	36
4.3	Dades generals de càlcul.....	41
4.3.1	Paràmetres de temps	41
4.3.2	General	41
5.	COMPARACIÓ DE RESULTATS.....	43
5.1	T = 100 anys.....	45
5.2	T = 5 anys.....	47
5.3	T = 2 anys.....	49
6.	CONCLUSIONS	51
7.	REFERÈNCIES.....	53

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1. Mina El Machorro. Font: Geomorphic reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites: The Alto Tajo Natural Park, Spain (Zapico et al., 2018).....	1
Figura 2. Tipus de runams exteriors. Font: Manual de Restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales de minería (ITGE, 1989).	5
Figura 3. Runams amb abocament per gravetat.	5
Figura 4. Runams construïts per tongades.....	6
Figura 5. Recuperació d'una mina a cel obert amb revegetació.....	6
Figura 6. Restauració geomorfològica a La Revilla (Segovia). Font: (Complutense Madrid, n.d.).....	8
Figura 7. Rellu dissenyat amb Natural Regrade on es veuen les corbes de nivell (en verd) i la xarxa de canals principals (en blau).....	10
Figura 8. Processos que es consideren en el mòdul hidrològic. FONT: Nuevas implementaciones e interfaz de usuario.	18
Figura 9. Localització de les zones minades a la vora del Parc Natural de l'Alto Tajo.	21
Figura 10. Situació del Parc Natural d'Alto Tajo. Font: Archivo:Situation Map of Alto Tajo Natural Park.Png - Wikipedia, La Enciclopedia Libre, n.d.....	22
Figura 11. Barranc de la Virgen de la Hoz. Font: El Parque Natural del Alto Tajo (Ibáñez Martínez, n.d.).	24
Figura 12. Mapa geològic de síntesis del Parc Natural. Font: Guía Geológica del Alto Tajo (Carcavilla et al., 2008).....	25
Figura 13. Foto aèria de la mina El Machorro. (a) cel obert; (b) abocador de residus no recuperats; (c), estanys; R1, R2 i R3: terrasses de col·luvions carbonatats; R4: recuperació geomòrfica mitjançant Geofluv-Natural Regrade; (ER): abocador de residus de recuperació minera experimental.	27
Figura 14. Restauració geomorfològica a la mina El Machorro dels anys 2012 i 2014. Foto: DGDRONE (2015).	28
Figura 15. Diferència dels DEM de 2012 i 2015.....	29
Figura 16. Diferència dels DEM de 2015 i 2017.....	30
Figura 17. Diferència dels DEM de 2017 i 2018.....	30

Figura 18. Erosió total per al període 2012-2018.....	31
Figura 19. Superfície que defineix la zona d'estudi.	32
Figura 20. Definició de la condició de contorn de sortida del problema.	33
Figura 21. Detall de la malla.....	33
Figura 22. Zones definides per a la classificació del terreny de la mina segons (Campos Moreno, 2016).....	35
Figura 23. Plànol guia i plànol de la zona d'estudi.....	36
Figura 24. Plànol "Hoja 3-3. Madrid".	37
Figura 25. Valors del quocient I_1/I_d per a la Península.	38
Figura 26. Corba IDF aplicable a la zona d'estudi.....	39
Figura 27. Hietograma de pluja neta per a un període de retorn de 100 anys.	40
Figura 28. Hietograma de pluja neta per a un període de retorn de 5 anys.....	40
Figura 29. Hietograma de pluja neta per a un període de retorn de 2 anys.....	40
Figura 30. Pestanya de Paràmetres de temps.....	41
Figura 31. Pestanya de General.....	41
Figura 32. Erosió real de la restauració per al període de 2012 a 2018.....	43
Figura 33. Divisió de la restauració per fer l'anàlisi.....	45
Figura 34. Erosió calculada (m) per a l'esdeveniment de 100 anys de període de retorn..	46
Figura 35. Erosió calculada (m) per a l'esdeveniment de 5 anys de període de retorn.	48
Figura 36. Erosió (m) per a l'esdeveniment de 2 anys de període de retorn.	49

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1. Grups hidrològics del sòl segons l'SCS.....	34
Taula 2. Textures del sòl. Font: Campos Moreno (2016).	34
Taula 3. Factor d'amplificació, K_T	37
Taula 4. Valors de P_d per als diferents períodes de retorn.	37

1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

1.1 INTRODUCCIÓ

La mineria és necessària per mantenir l'estil de vida actual de la societat i és una activitat que continuarà creixent en els anys futurs. Tanmateix, aquesta pot ser perjudicial per a la salut i la seguretat públiques i, sobretot, pot causar danys al medi ambient, tant en el lloc de la mina com fora (Martín-Moreno et al., 2018). Afecta tots els components de l'ecosistema: substrats, topografia, hidrologia superficial i aigües subterrànies, sòl, vegetació, fauna, atmosfera i paisatge (Zapico et al., 2018).



Figura 1. Mina El Machorro. Font: Geomorphic reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites: The Alto Tajo Natural Park, Spain (Zapico et al., 2018).

L'erosió del sòl és un dels efectes més significatius, sinó el que més, sent un problema a l'hora de dur a terme les pràctiques de restauració, ja que afecta el creixement de la vegetació a través de diferents mecanismes (Zapico et al., 2018).

A més, la mineria pot generar problemes aigües avall del lloc on aquesta es dona, perjudicant greument el medi ambient (Zapico et al., 2018): la qualitat de les aigües disminueix considerablement, ja que s'aboca a aquestes una gran quantitat de sediment.

Aquesta activitat no és ben rebuda per la societat degut als efectes ambientals que té i als efectes visuals que genera una mina a cel obert:

- Modifica l'aspecte del paisatge.
- Disminueix la qualitat paisatgística.

- S'introdueixen elements a l'entorn com maquinària.
- Contaminació acústica deguda a la maquinària, explosius, trànsit de vehicles pesats, etc.
- Disminueix la qualitat atmosfèrica, per la generació de pols i gasos.

Les pràctiques de rehabilitació de la indústria minera han de ser cada cop més sofisticades i això serà possible degut a l'augment de coneixement que hi ha sobre els impactes ambientals de les mines i que, cada cop més, la sostenibilitat del paisatge a llarg termini és més estricta (Hancock, 2004).

La restauració geomorfològica fluvial és una tècnica emergent per a la rehabilitació de terrenys pertorbats degut a moviments de terres, com ho son les mines, amb la finalitat d'aconseguir estabilitat davant l'erosió a llarg termini (Zapico et al., 2020). El mètode més conegut per a la restauració geomorfològica és el GeoFluv que, conjuntament amb el software Natural Regrade garanteixen una estabilitat geomorfològica, permetent obtenir beneficis econòmics, socials i ecològics i, a més, es minimitza el manteniment de les superfícies restaurades (Martín-Duque, 2012).

És interessant combinar l'ús de les restauracions geomorfològiques amb models d'erosió del sòl, ja que ens ajudaria a analitzar l'estabilitat del sòl, a més del funcionament hidràulic i hidrològic. Per tant, el modelatge de l'erosió ens ofereix la possibilitat de provar la integritat a llarg termini dels dissenys realitzats (Hancock et al., 2019).

Hi trobem diferents softwares, dels que parlarem més endavant, que serveixen per simular l'evolució geomorfològica de les formes de relleu sotmeses a processos d'erosió fluvial i de transport de sediment, com SIBERIA o CAESAR.

En aquesta tesina s'usarà Iber, que és un model numèric bidimensional de flux turbulent en làmina lliure en règim no permanent i de processos mediambientals en hidràulica fluvial (Sanz-Ramos et al., 2022), per comprovar si aquest és capaç de complementar el mètode Geo-Fluv i, així, aconseguir restauracions més estables. Es partirà de la topografia de la restauració geomorfològica feta a la mina El Machorro, ubicada al Parc Natural de l'Alto Tajo, a Guadalajara, feta per José F. Martín Duque, entre altres.

1.2 OBJECTIUS

L'objectiu principal del present treball serà l'anàlisi del funcionament hidràulic i hidrològic i l'estabilitat del sòl de geometries generades amb GeoFluv, és a dir, geometries fetes per l'estudi de restauracions geomorfològiques de mines a cel obert.

Concretament, s'estudiarà el comportament d'una restauració geomorfològica feta a una de les canteres situades al Parc Natural de l'Alto Tajo mitjançant la modelització numèrica bidimensional amb el software Iber.

La idea és veure si es pot usar l'eina de modelització numèrica Iber com una eina complementària al GeoFluv - Natural Regrade, per tal de crear unes restauracions geomorfològiques més precises i estables, comparant les tendències erosives que surten amb Iber amb els valors d'erosió real.

2. ESTAT DEL CONEIXEMENT

2.1 RESTAURACIÓ DE MINES

Una gran part de les activitats fetes per l'esser humà són, en major o menor grau, agressives per al medi ambient. Les mines tenen un especial interès ja que, un cop s'ha extret tot el material que es necessitava, si no es dona una restauració, la zona usada per la mina queda en situació de degradació sense possibilitat real d'aprofitament (ITGE, 1989).

Per tant, l'objectiu principal de la restauració de mines és mitigar els efectes i impactes generats. Aquests poden ser impactes ambientals, ecològics, visuals i socials, entre altres, i són deguts principalment al moviment de terres, l'eliminació vegetal natural i, en conseqüència, la destrucció i pèrdua d'hàbitats (*Restauración de Minas – ONEP, n.d.*).

La generació de residus sòlids i líquids i el seu alliberament a l'entorn són un dels impactes més importants que es donen sobre el medi ambient associat a la mineria. L'escolament i, per tant, el transport de sediment aigües avall de la mina, afecta directament als ecosistemes, ja que aquests estan relacionats amb la qualitat de l'aigua (Martín-Moreno et al., 2018).

S'espera que la restauració de mines eviti impactes tant dins com fora de la zona de la mina. Per poder aconseguir un control efectiu de l'erosió del terreny es requereix una gestió conjunta dels residus miners, la topografia, l'aigua de la zona, la cobertura del sòl i la vegetació (Zapico et al., 2018).

La rehabilitació de zones que han tingut activitat minera pot anar des d'una duplicació exacta o similar de les condicions originals del terreny, que seria quan podem parlar de restauració, fins a intentar aconseguir un aprofitament que no es el mateix que hi havia originalment, i estaríem parlant, doncs, de rehabilitació o recuperació (ITGE, 1989).

2.1.1 Mètodes tradicionals

Quan parlem de mètodes tradicionals, ens referim a aquells mètodes més comunament usats fins als últims anys en la restauració de mines. El disseny de la forma de relleu d'aquets normalment implica formes de terra en terrassa (Zapico et al., 2018). Aquesta metodologia es caracteritza per un disseny inadequat de la forma del relleu, amb un sistema de drenatge ineficient a llarg termini, que tendeix a l'erosió i la generació de rierols i barrancs.

Les roques estèrils que surten de les explotacions mineres solen ser fragments gruixuts que s'apilen en el que s'anomenen runams. Aquests es poden apilar a diferents llocs de la mina, com mostra la imatge següent:

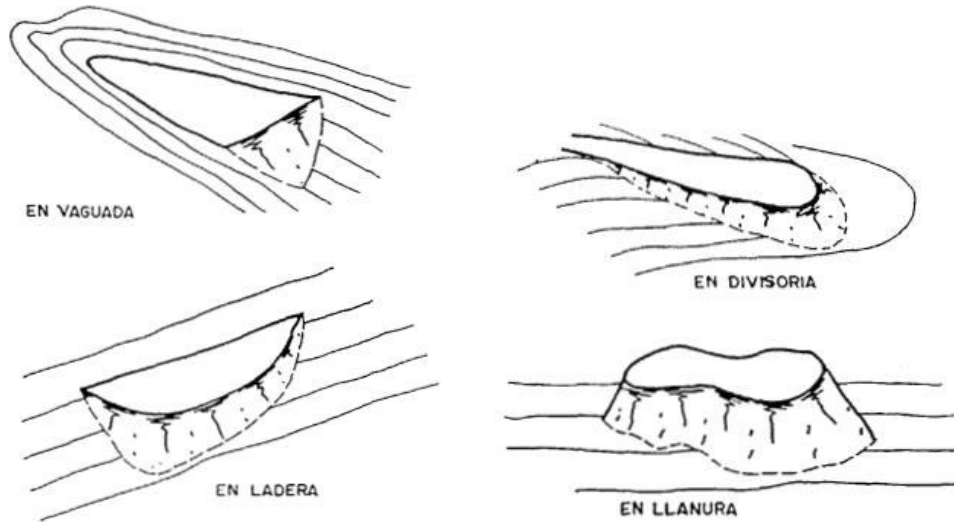


Figura 2. Tipus de runams exteriors. Font: Manual de Restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales de minería (ITGE, 1989).

I es poden dipositar segons diferents mètodes:

- Per basculament final. La idea d'aquest és descarregar els estèrils des de gran altura, aconseguint unes condicions de drenatge adequades per la segregació natural que pateix el material durant el descens.

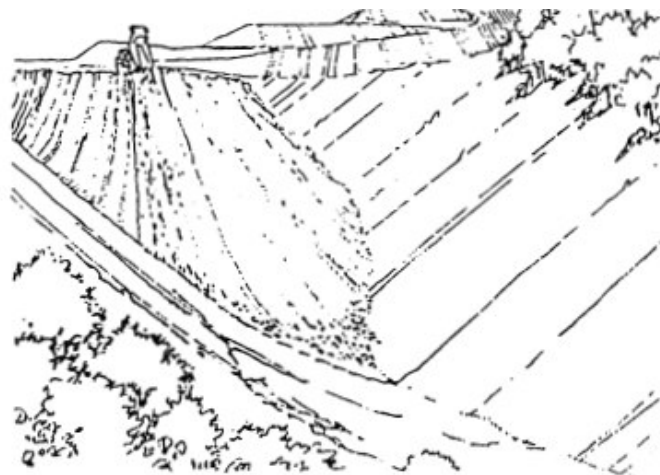


Figura 3. Runams amb abocament per gravetat.

- Per tongades. Els estèrils es dipositen i compacten en capes o tongades, creant un nucli central d'escullera i, per tant, aconseguint les condicions de drenatge desitjades.

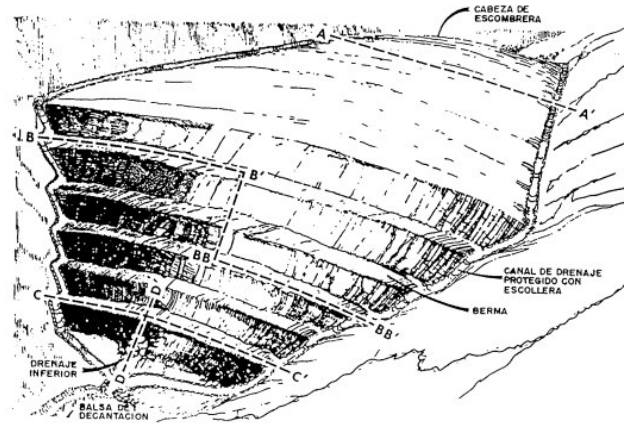


Figura 4. Runams construïts per tongades.

Els materials estèrils que formen els runams són de diferents litologies i granulometries, plantejant problemes físics i, fins i tot químics, per a la implementació de vegetació (ITGE, 1989).

La recuperació d'aquestes formes del terreny consisteix, generalment, en ficar una coberta vegetal o donar-li algun ús al terreny. Abans, però, és necessari comprovar l'estabilitat dels estèrils. La solució més senzilla és modificar la geometria de les estructures existents remodelant el talús, amb el que s'aconsegueix una reducció del moment de les forces desestabilitzadores i es millora el coeficient de seguretat (ITGE, 1989).



Figura 5. Recuperació d'una mina a cel obert amb revegetació.

Encara havent dissenyat una recuperació amb criteris d'estabilitat geotècnica, l'erosió dels abocadors de residus és bastant freqüent, sobretot a la mineria de muntanya, i sol crear dipòsits d'al·luvions aigües avall, generant uns forts impactes ambientals (Martín-Moreno et al., 2018). Això és perquè l'erosió fluvial dels dipòsits d'estèrils no s'ha resolt correctament.

És per això que es necessita, a més a més, una altra mesura. Aquesta consisteix en drenar bé les estructures per evitar erosió i pressions intersticials (ITGE, 1989). Com s'ha dit, un dels problemes greus que es veuen en les restauracions és el del disseny d'aquests sistemes de drenatge. Els sistemes que veiem a la natura són vulnerables a les inundacions o als esdeveniments extrems però, a diferència de sistemes de drenatge artificials, són capaços d'adaptar-se a les noves condicions.

El primer problema que hi trobem és la manca de guies per al bon disseny de sistemes de drenatge, que tinguin en compte els impactes reals de les inundacions i la fallada d'aquests. Després, la inexistència de mecanismes d'autorecuperació, que fan que es generi una erosió molt accelerada i una recol·locació dels canals. Tots aquests impactes són molt severos dins dels canals artificials a zones de mines recuperades (Hancock et al., 2019).

S'han vist molt casos on aquestes mesures i aquesta tipologia de recuperació de mines és ineficient i dona lloc a una alta inestabilitat. Doncs, les terrasses construïdes amb els abocadors de residus no són suficients per a estabilitzar les mines.

2.1.2 Restauracions geomorfològiques i el mètode Geofluv

Les restauracions geomorfològiques tenen com a objectiu principal aconseguir l'estabilitat a llarg termini contra l'erosió. A més, serveixen per garantir un manteniment reduït de la zona i permeten un augment de la biodiversitat. La idea és desenvolupar un enfocament alternatiu als accidents geogràfics d'enginyeria tradicional en la rehabilitació de terres (Hancock et al., 2019).

Aquest concepte surt de la quantitat de fracassos que han existit en restauracions de mines, encara que aquestes han tingut una gran millora en les últimes dècades. Aquests fracassos són comuns en processos de restauració amb el propòsit principal del modelatge del terreny centrant-se en l'estabilitat geotècnica exclusivament o en la idea de reduir l'impacte visual (Duque & Bugosh, 2013). Tots ells tenen en comú la inexistència d'un estudi adequat de la resistència enfront l'erosió hídrica i fluvial, així com la "funcionalitat" ecològica de les restauracions.



Figura 6. Restauració geomorfològica a La Revilla (Segovia). Font: (Complutense Madrid, n.d.)

La introducció de principis geomòrfics en la restauració de mines va ser desenvolupat als EE.UU i Austràlia a finals de la dècada del 1970 i principis del 1980. Al principi de tot, es va incorporar un requisit, usat encara avui dia, que és el concepte de Contorn Original Aproximat (AOC) i que està inclòs a la Llei de Control i Recuperació de Minería de Superfície als Estats Units. Aquest obliga a que qualsevol zona restaurada d'una mina sigui molt semblant a la configuració que hi havia inicialment a la superfície del terreny i que s'integri i complementi de manera adequada el patró de drenatge dels voltants, és a dir, demana una integració de la superfície recuperada i un disseny dels canals naturals amb major capacitat i àrea transversal (Hancock et al., 2019).

Els sistemes de drenatge naturals funcionen de manera que, si la capacitat d'un canal és superada, la plana d'inundació adjacent serveix per donar una secció molt més ampla per a que l'aigua hi pugui discórrer, disminuint la seva velocitat i el flux, ja que una quantitat d'aigua es queda emmagatzemada a la plana (F. Sawatsky & R. E. Beckstead, 1996). Una altra diferència entre els canals artificials i naturals és que, aquests últims, tenen un llit mòbil, que variarà segons l'esdeveniment que es doni, permetent el restabliment del seu estat original. Finalment, destacar la formació de meandres, que il·lustren molt bé el caràcter dinàmic dels sistemes naturals.

Per tant, per poder tenir un bon sistema de drenatge, és important dissenyar tenint en compte les característiques del sistemes naturals i acceptant que els canals evolucionaran amb el temps però que tindran la capacitat suficient per acomodar-se.

Com diu l'Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement dels Estats Units, la restauració geomorfològica permet dissenyar formacions del relleu i rierols estables que imiten tant l'aspecte com la funcionalitat de la natura (Zapico et al., 2018).

Amb qualsevol paisatge, la topografia que es vol reconstruir s'ha de dissenyar amb la finalitat d'aconseguir un ecosistema viable a llarg termini alhora que s'allibera una quantitat

de sediment coherent o compatible amb el paisatge reconstruït i el dels voltants (Hancock, 2004).

Així doncs i, a diferència dels mètodes tradicionals que tenen un interès molt centrat en l'estabilitat geotècnica, les restauracions geomorfològiques es centren en els processos geomòrfics, sobretot en la erosió hídrica i fluvial, que tenen lloc durant un temps prolongat dins d'una conca de drenatge, intentant aconseguir un paisatge reconstruït que s'aproximi a un estat estacionari.

Totes els aprenentatges i actualitzacions que s'han donat des de que es va introduir el concepte d'AOC van donar lloc a la metodologia Geofluv.

Geofluv és un mètode geomòrfic fluvial usat per al disseny de la recuperació de terres que ajuda als usuaris a dissenyar el tipus de forma de relleu que es formaria de manera natural per processos d'erosió, sota les condicions climàtiques i fisiològiques del lloc estudiat (Bugosh & Epp, 2019). És capaç de reproduir els accidents geogràfics naturals i les xarxes de drenatge dins de les conques.

Aquest mètode es va començar a usar en grans mines de carbó a Nou Mèxic l'any 1999 amb l'objectiu de trobar estabilitat erosiva a llarg termini, un manteniment mínim i generar un augment de la biodiversitat, diferenciant-se així dels mètodes tradicionals (Hancock et al., 2019).

Geofluc dissenya i reconstrueix les formes del terreny des d'una base experta establerta per la hidrologia i la geomorfologia, i ha resultat ser decisiu per al control de l'escolament o per a la restitució de processos ecològics, gràcies a que recuperen l'estructura dels ecosistemes. El procediment que usa és: identificar el tipus de xarxa de drenatge, és a dir, la densitat i la morfologia de les valls i canals, i el perfil dels vessants dels interfluvis que s'arribarien a formar passat un període llarg de temps (Martín-Duque, 2012), per a uns materials, un relleu i un clima determinats.

Tot això es complementa amb el software Natural Regrade, que és la implementació informatitzada del mètode Geofluv. Aquest software serveix per generar i avaluar de manera ràpida els dissenys fets en un format CAD a partir dels valors d'entrada (Bugosh & Epp, 2019).



Figura 7. Relleu dissenyat amb Natural Regrade on es veuen les corbes de nivell (en verd) i la xarxa de canals principals (en blau).

Zapico et al. (2018) ens descriu els passos a seguir per dur a terme un procés de restauració geomorfològica Geofluv – Natural Regrade:

1. Localitzar formes de relleu naturals que siguin estables, amb materials similars als de la zona que s'ha de restaurar i que tinguin unes condicions mediambientals similars (clima, sòl i vegetació), i mesurar les seves característiques, que serviran com a inputs.
2. Obtenir un arxiu de CAD del lloc i dissenyar l'àrea de disseny i les seves condicions topogràfiques.
3. Fer un disseny de restauració geomorfològica seguint Geofluv – Natural Regrade i revisar-ho per garantir que compleix els criteris de disseny i proporciona un funcionament correcte. Es solen estudiar varies alternatives.
4. Exportar tota la informació topogràfica per guiar la construcció mitjançant maquinària.
5. Construir les formes de relleu dissenyades, amb la seva corresponent substitució de sòls i revegetació.
6. I, finalment, portar un seguiment de la resposta hidrològica i erosivo-sedimentària.

Del que s'ha descrit fins ara es pot deduir de manera molt clara que aquest mètode és realment bo, des del punt de vista ambiental i social.

Martín-Duque (2012) ens parla de com aquest mètode s'està imposant cada cop més en països com Estats Units, Canadà o Austràlia i dels beneficis econòmics per a qui el desenvolupa:

- Es redueix el cost addicional d'aquest tipus de reconstrucció. Això és perquè s'estalvia en construcció d'estructures artificials i en manteniment. Com la idea és

recrear formes de terreny estables des del primer moment, el manteniment que s'haurà de fer d'aquestes serà quasi nul.

- En alguns països no es torna la fiança minera fins que no es demostra que aquesta ha eliminat qualsevol tipus d'afecció al medi ambient i és per això que aquest mètode s'ha promogut en algunes empreses.
- En molts casos s'ha acceptat una proposta d'explotació, prèviament rebutjada, després d'enfocar-la amb aquest mètode.

La societat d'avui dia està molt conscienciada de la importància de cuidar el medi ambient. Les mines no tenen una bona acceptació, primer pel gran impacte visual que generen i, després, per l'impacte directe que tenen sobre el medi. Amb una proposta d'aquest tipus per dur a terme una restauració s'incrementaria l'acceptació social de l'activitat minera i es maximitzarien les possibilitats de l'ús del sòl restaurat (Martín-Duque, 2012). Els paisatges que s'aconsegueixen són visualment molt atractius i estan en concordança amb l'entorn, ja que es basen la fisiografia d'aquest.

Calen destacar també els beneficis ecològics, ja que no s'usen pràcticament materials externs donat que, en la gran majoria dels casos, les restauracions es fan amb els estèrils miners. Es construeixen una sèrie de canals que simulen els que hi hauria de manera natural, transportant aigua i sediments i generant una integració ambiental, a més de maximitzar la biodiversitat de l'entorn.

Per veure quina és la percepció de la gent sobre les canteres i què en pensen de la restauració d'aquestes, s'ha fet una petita enquesta, a un total de 151 persones. Es volia constatar la visió negativa que hi ha sobre les mines a cel obert i com les persones prefereixen una restauració mediambientalment més positiva, com són les restauracions geomorfològiques, a les restauracions tradicionals o a no fer cap tipus de restauració. De l'enquesta es poden treure les següents conclusions principals:

- La majoria de les persones han contestat tenir una impressió dolenta, des del punt de vista mediambiental, de les canteres.
- En canvi, si parlem des del punt de vista socioeconòmic, hi ha més gent que pensa de manera positiva.
- El 90% dels participants considera important el fet de restaurar o recuperar les canteres un cop s'ha acabat la seva activitat i molts d'aquests creuen que una restauració geomorfològica és millor opció envers dels mètodes tradicionals.

2.2 ESTABILITAT EROSIVA

Per avaluar l'estabilitat erosiva (tot el material erosionat i/o dipositat), l'estabilitat hidrològica o veure com evolucionaran les solucions de restauracions, existeixen el que s'anomenen models numèrics d'erosió del sòl. Són un complement molt útil per poder provar diferents idees de disseny, amb diferents propietats del sòl i fer anàlisis de riscos.

Van ser desenvolupats a la dècada del 1970 i feien servir una malla de cel·les de quadrícula (Hancock et al., 2019) per representar un paisatge i una xarxa de canals. Simulaven l'evolució del paisatge dirigint l'aigua per aquesta malla i variant les elevacions de les cel·les de la quadrícula per representar l'erosió o deposició (T. J. Coulthard, 2001).

Amb el pas dels anys i, amb una millora de la capacitat computacional, s'ha vist un augment en la mida de la conca a estudiar, una representació més detallada dels processos que es donen, la opció de fer servir malles irregulars i la possible aplicació d'aquests models en casos reals (T. J. Coulthard, 2001).

Durant les últimes dècades s'han desenvolupat els Models d'Evolució del Paisatge (LEM), basats en les interaccions entre els principals factors que governen la hidrologia i la morfologia de les conques (Benaïchouche et al., 2016). Aquests avaluen l'estabilitat del paisatge a curt (anual), mitjà (centenars d'anys) i llarg termini (milers d'anys). La capacitat per poder treballar amb Xarxes de Triangles Irregulars (TIN) o Models d'Elevació Digitals (José & Monsalve, 2009) va generar un gran interès en el desenvolupament de models distribuïts en l'espai, per poder representar els processos fluvials i de vessant.

És important la definició d'un sistema físic, que seria el paisatge, els processos que actuen en aquest i l'escala, tant temporal com espacial, d'aquests processos.

A continuació es fa una petita introducció d'alguns dels diferents models que s'usen avui dia per avaluar l'erosió del sòl i l'evolució del paisatge.

2.2.1 SIBERIA

SIBERIA és un model predictiu matemàtic de base física que pot simular l'evolució geomòrfica del terreny sotmès a processos d'erosió fluvial i de transport. Fa servir models d'erosió i hidrologia ben acceptats a escales temporals llargues.

Empra una malla de cel·les quadrades i, per a cada iteració i cada cel·la, el model determina un cabal de descàrrega que és funció d'una constant d'escolament i de l'àrea de captació que contribueix (T. J. Coulthard, 2001). Amb el valor de la descàrrega i, si supera o no un valor

determinat que ve donat per la resistència del material del terreny, es pot saber si es donarà erosió o no.

L'equació de transport de sediments que usa SIBERIA consta de dues parts:

$$q_s = q_{sf} + q_{sd}$$

on q_s (m³/s/m ample) és la taxa de transport de sediments per unitat d'ample, q_{sf} és el transport fluvial de sediments i q_{sd} és el terme de transport difusiu.

El primer terme q_{sf} modela la incisió de la superfície del terreny i es basa en l'equació d'Einstein-Brown. Es pot expressar com

$$q_{sf} = \beta_1 \cdot q^{m_1} \cdot S^{n_1}$$

on q (m³/s/m ample) és el cabal per unitat d'amplada, S (m/m) és el pendent en la direcció del pendent més pronunciat i β_1 , m_1 i n_1 són paràmetres calibrats del model.

El terme de transport difusiu, q_{sd} (m³/m/s), modela la suavització de la superfície terrestre i és

$$q_{sd} = D \cdot S$$

on D (m²/s ample) és la difusivitat lineal i S (m/m) és el pendent. Aquest terme combina els efectes de la fluïdesa, esquitxades de la pluja i el lliscament de terres.

SIBERIA no modela l'escolament directament sinó que usa una parametrització efectiva de la subquadrícula basada en observacions empíriques i justificades per anàlisis teòrics, que relaciona conceptualment el cabal amb l'àrea (A) que drena a través d'un punt com

$$Q = \beta_3 \cdot A^{m_3}$$

on β_3 és la constant de velocitat d'escolament i m_3 és l'exponent de l'àrea. Ambdós necessiten que calibratge a camp.

Aquest model té un avantatge i és que usa models digitals d'elevació del terreny per a la representació de la conca i la determinació d'àrees de drenatge (Hancock et al., 2019). Amb això s'aconsegueix veure de manera molt clara com respon a l'erosió i deposició.

Normalment, quan es volen veure canvis a llarg termini, no es modelen esdeveniments individuals sinó que es fa la mitja de molts esdeveniments que s'han donat durant aquest un llarg període de temps (Hancock et al., 2010). Amb això el que ens dona el programa és el que s'espera que passi, de mitjana, a la conca en un moment donat.

2.2.2 CAESAR

El model CAESAR, de manera similar a SIBERIA, simula l'evolució del paisatge movent l'aigua a través d'una malla de quadrícula regular i variant l'elevació de cada cel·la segons si hi ha erosió o deposició. Aquest model va ser dissenyat per treballar amb escales temporals llargues, de 10 a 10000 anys.

Per a cada cel·la es guarden uns valors representatius dels paràmetres hidrològics, la mida del gra, cabal d'aigua, vegetació... (Hancock et al., 2010) i, amb cada iteració, es van variant seguint unes regles, que es poden agrupar en: encaminament hidràulic, erosió i deposició fluvial i processos de pendent, com són la fluència del sòl i el moviment de masses.

Es pot executar en dos modes (Tom J. Coulthard et al., 2013):

- Mode de conca. En aquest es simula sense cap tipus de flux d'entrada, només l'entrada de precipitació per generar escolament sobre la conca
- Mode d'abast. A diferència de l'anterior mode, aquí es poden afegir fonts de descàrrega, tant d'aigua com de sediments, que hauran de ser definides per l'usuari.

Per ambdós modes (Tom J. Coulthard et al., 2012) es necessita especificar diversos paràmetres i condicions inicials, com poden ser l'elevació, mida del gra, la pluja en el cas del mode de conca o el cabal d'entrada en el mode d'abast.

Per a poder iniciar una simulació amb CAESAR es necessita un Model Digital d'Elevació de la zona d'estudi, dades de precipitació i dades de distribució de partícules del sòl. El model usa un algoritme que calcula una aproximació de flux uniforme i en estat estacionari del flux que tenim (Tom J. Coulthard et al., 2012) i, encara que el flux és el principal motor del model, els canvis que es donen en la morfologia són deguts a l'arrossegament, transport i deposició de sediments.

Per calcular les profunditats i velocitats de flux es calculen els cabals a partir de l'equació de Manning i, per al càlcul del transport de sediments, ofereix dos mètodes basats en les equacions d'Einstein (1950) i de Wilcock i Crowe (2003). Per a cada fracció de sediment, calcula les taxes de transport com:

$$q_i = \frac{F_i \cdot U_*^3 \cdot W_i^*}{(s - 1) \cdot g}$$

on F_i és el volum fraccionari del sediment i-èssim de la capa activa, U_* és la velocitat de tall, s és la relació entre el sediment i la densitat de l'aigua, g la gravetat i W_i^* és una funció que

relaciona la taxa d'una fracció del transport amb la taxa de transport total (Van De Wiel et al., 2007).

Les taxes de transport es poden convertir en volums multiplicant pel pas de temps de cada iteració:

$$V_i = q_i \cdot dt$$

La principal diferència que hi trobem entre aquest model i el SIBERIA és que, en el primer, s'usen tempestes individuals, mitjançant un registre pluja horari i, en el segon, s'usen taxes anuals mitjanes (Hancock et al., 2010). Es recomana usar SIBERIA per escales de temps molt llargues i, si es necessita detall sobre un esdeveniment individual, CAESAR ens donarà resultats més precisos, encara que amb un temps de simulació més llarg.

2.2.3 GOLEM

GOLEM és un altre model existent que avalua l'evolució del paisatge a llarg termini (de centenars a milions d'anys) i avalua les relacions que hi pot haver entre l'erosió i la tectònica. Va ser dissenyat i desenvolupat pel professor R. Slingerland i el Dr. G. E. Tucker i codificat en llenguatge de programació informàtica "C" del Dr. Tucker.

Per representar el paisatge usa una malla ortogonal amb cel·les quadrades (Odoni, 2007), igual que en els altres dos models dels que s'ha parlat. El domini pot tenir una o varies sortides de drenatge, segons es necessiti i aquestes es consideraran que tenen una elevació de zero, mesurant així totes les elevacions a partir d'aquí.

Com parlem de períodes de temps d'estudi molt llargs, la dinàmica fluvial es redueix a un enfocament bidimensional descrivint erosió, transport i sedimentació, i ignorant l'estil fluvial i les característiques geomètriques del canal (Benaïchouche et al., 2016). Per tant, el model fluvial ve donat per l'equació següent:

$$\frac{\partial z(x, t)}{\partial t} = U(x, t) - E(x, t)$$

on x (L, m) i z (L, m) són la abscissa i l'elevació d'un punt del canal, t (T, s) és el temps, U és l'índex d'elevació extern (m/s) i E fa referència a una funció que parla de l'erosió o deposició del llit del riu.

Per descriure els processos que expliquen la quantitat de sediment transportat que resulta de l'erosió del riu i els talussos es poden usar dos models: models de desprendiment limitat, on es no es té en compte el sediment, i models de transport limitat, on el llit rocós del riu està fora d'abast.

GOLEM no permet simular un esdeveniment individual d'inundació. El que fa és calcular la descàrrega de cada cel·la en funció d'una taxa d'escolament teòrica i ve donada per la següent expressió (Odoni, 2007):

$$Q = P \cdot A$$

on P és l'escolament per cel·la en un període de temps, A és l'àrea total que drena i Q és el cabal de la cel·la. El flux segueix sempre la ruta amb més pendent.

És capaç de separar aquelles cel·les que tenen canal i on, per tant, s'usen les funcions de transport fluvial i aquelles on només actuarien els processos de vessant. El programa necessita els següents *inputs* (Benaïchouche et al., 2016): la topografia de la zona en format DEM amb una malla regular, condicions de contorn, durada de la simulació i l'interval de temps per a resultats intermedis i el valor dels paràmetres de les equacions abans anomenades.

2.3 IBER

Per a aquest treball, es farà servir el software Iber per veure si aquest és capaç de complementar l'ús de Geofluv - Natural Regrade a l'hora d'estudiar restauracions geomorfològiques.

És un model numèric de simulació de flux turbulent en làmina lliure en règim no permanent i de processos mediambientals. Aquest va ser desenvolupat en coordinació de l'Institut Flumen, de la Universitat Politècnica de Catalunya i el grup GEAMA (Grupo de Enseñaría da Agua e do Medio Ambiente) de la Universidade da Coruña, el Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), i el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

El model Iber es va presentar per primer cop al juny de 2010. Llavors, Iber comptava únicament amb tres mòduls de càlcul principals que s'han anat millorant a més de incorporar altres nous.

El rang d'aplicació d'aquest és molt ampli: hidrodinàmica fluvial, simulació de trencament de preses, avaluació de zones inundables, càlcul de transport de sediments, qualitat d'aigua en rius i zones costaneres no estratificades, entre altres.

A dia d'avui, el model Iber consta de diferents mòduls de càlcul:

- Mòdul hidrodinàmic
- Mòdul de transport de sediments

- Mòdul de qualitat de les aigües
- Mòdul d'hàbitat
- Mòdul de drenatge urbà
- Mòdul d'erosió de sòls

El que fa aquest model és resoldre numèricament les equacions de Saint-Venant bidimensionals. Aquestes també es coneixen com equacions d'aigües someres mitjanes en profunditat, perquè són aplicables a flux poc profund i proporciona valors de velocitat mitjans en profunditat. Aquestes equacions assumeixen una distribució de pressió hidrostàtica i una distribució uniforme de la velocitat en la profunditat.

Per aconseguir uns bons resultats és necessària una bona malla de càlcul. Iber té la possibilitat de fer servir malles regulars i irregulars, així com estructurades o no estructurades. Alhora, pot treballar tant amb elements triangulars com quadrilàters o amb malles mixtes, deixant per al propi usuari l'elecció d'aquella més adient per al problema que es vol resoldre.

Per a aquest treball ens centrarem en el mòdul hidrològic, que ens permet calcular la transformació pluja-escolament a tota una conca, que en aquest cas serà la zona d'una mina restaurada. Es tracta d'un model hidrològic distribuït, és a dir, realitza el càlcul a cadascun dels elements en que ha discretitzat l'àrea d'estudi (a cada element de la malla de càlcul) i permet obtenir els resultats dels paràmetres calculats (calats, velocitats, tensions, etc.) distribuïts espacialment, cosa que no s'aconsegueix amb els models agregats.

Es basa en les equacions hidrodinàmiques d'aigües poc profundes bidimensionals, esmentades anteriorment, que s'usen per resoldre el moviment de l'escolament per sobre del terreny. Les equacions que resol el mòdul hidrodinàmic són les de conservació de la massa i de moment en les dues direccions i s'expressen com

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s \\
 & \frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} \\
 & = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{2 \partial x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \\
 & \frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} \\
 & = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{2 \partial y} - 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y
 \end{aligned}$$

on h és el calat, U_x i U_y són les velocitats mitjanes en profunditat per a les dues direccions, g és la gravetat, Z_s l'elevació de la làmina lliure, τ_s és la fricció en la superfície lliure deguda a la fricció provocada pel vent, τ_b la fricció deguda a la fricció de fons, ρ la densitat de l'aigua, Ω és la velocitat angular de rotació de la Terra, λ la latitud del punt considerat, τ_{xx}^e , τ_{xy}^e i τ_{yy}^e són les tensions tangencials efectives horitzontals i, per últim, M_S , M_X i M_Y són els termes font de massa i de moment, a partir dels quals es realitza la modelització de precipitació, infiltració i embornals.

Per tant, es basa en el mòdul hidrodinàmic però afegint alguns processos com l'aportació d'aigua de pluja i la infiltració d'aigua en el terreny. Es realitza un balanç de la massa d'aigua distribuït en l'espai a nivell d'element de la malla de càlcul, on es consideren els següents processos:

- Infiltració
- Evapotranspiració
- Percolació
- Flux al subsol

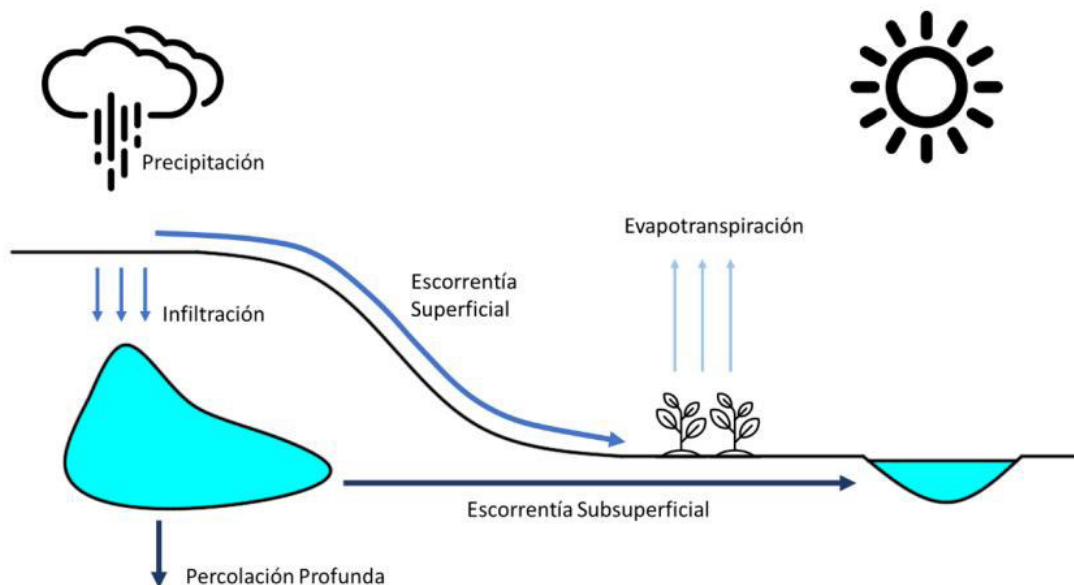


Figura 8. Processos que es consideren en el mòdul hidrològic. FONT: Nuevas implementaciones e interfaz de usuario.

2.3.1 Escolament superficial

El càlcul de l'escolament superficial i la seva transformació al llarg de la conca hidrogràfica es fa amb les mateixes equacions que Iber fa servir per calcular la hidrodinàmica, descrites anteriorment, i inclou termes que representen les components de precipitació i infiltració. La única diferència que hi ha és que en el mòdul d'hidrologia s'inclouen dos esquemes

numèrics nous per a la resolució de les equacions, que donen resultats més estables, que són els DHD i DHD_basin. El DHD (*Decoupled Hydrological Discretization*) permet resoldre les equacions d'aigües someres mitjanen en profunditat i el seu ús en aplicacions hidrològiques proporciona solucions estables i precises amb un menor temps computacional (Cea & Bladé, 1969).

Per tant, tenim les equacions següents:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = R - f$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - g \frac{n^2}{h^{\frac{7}{3}}} |q| q_x$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - g \frac{n^2}{h^{\frac{7}{3}}} |q| q_y$$

on h és el calat, (q_x, q_y) són les dues components del cabal unitari o específic, $|q|$ és el mòdul del cabal unitari, R és la intensitat de precipitació, f la taxa d'infiltració d'aigua superficial al subsol, z_b és la cota de fons, g és l'acceleració de la gravetat i n el coeficient de Manning.

2.3.2 Precipitació

Iber permet introduir la precipitació de dues maneres diferents. La primera és a partir de hietogrames extrets de series temporals d'intensitat de precipitació observades a pluviòmetres de coordenades conegudes i, la segona, és usant fitxers ràster georeferenciats, on es tenen definits camps especials d'intensitat o profunditat de precipitació en diferents instants de temps.

2.3.3 Infiltració

El software inclou 4 models d'infiltració, que són les formulacions més usades per al càlcul de la infiltració. S'ha de tenir en compte que la infiltració d'aigua en el terreny és un procés complex que pot ser difícil de representar amb qualsevol formulació.

Model lineal

Aquest model permet introduir unes pèrdues inicials i una infiltració potencial constant en el temps. És el model més senzill i pot ser útil quan s'estudien esdeveniments curts. També pot usar-se per considerar el cas on el terreny té una capacitat d'infiltració molt alta inicialment i, un cop es satura, la infiltració disminueix fins a arribar a un valor constant.

Model Green-Ampt

Aquest model usa una formulació basada en paràmetres físics que es poden relacionar amb propietats del terreny. Ens dona una infiltració potencial alta inicialment, que depèn de la succió i la humitat del sòl, i va disminuint en el temps de manera exponencial, fins que arriba a un valor que és igual a la permeabilitat saturada del terreny.

Model del Número de Corba del SCS

Es generen unes pèrdues inicials que van seguides d'una capacitat d'infiltració variable que disminueix de manera aproximadament exponencial en el temps. Aquest model només depèn d'un únic paràmetre que es pot relacionar amb el pendent del terreny, el tipus de sòl i els usos d'aquest.

Model d'Horton

Aquest model és similar al de Green-Ampt, en quant a la seva capacitat d'infiltració generada, però els seus paràmetres no estan relacionats directament amb les característiques del sòl.

2.3.4 Evapotranspiració

La evapotranspiració potencial es calcula mitjançant la formulació proposta per Blaney and Criddle i posteriorment modificada per Doorenbos and Pruitt (1977). Aquesta formulació és bastant senzilla ja que només necessita un paràmetre.

La evapotranspiració real es calcula d'una manera o altre segons els model d'infiltració escollit: evapotranspiració amb el model d'infiltració de Green-Ampt, evapotranspiració per al model del SCS continu i evapotranspiració real amb els models d'infiltració lineal, SCS i Horton.

2.3.5 Percolació

Igual que per a la evapotranspiració, la percolació es calcularà de diferents maneres segons el model d'infiltració seleccionat i també tindrem tres maneres: amb el model d'infiltració de Green-Ampt, amb el model d'infiltració de SCS continu i la última és amb els models d'infiltració lineal, SCS i Horton.

2.3.6 Flux subsuperficial

Iber inclou dos models de flux subsuperficial que són un model agregat i un model distribuït. El primer es pot fer servir amb qualsevol de les formulacions d'infiltració esmentades anteriorment i, el segon, s'ha d'usar conjuntament amb el model d'infiltració de Green-Ampt ja que fa servir alguns dels seus paràmetres.

3. ZONA D'ESTUDI

3.1 CARACTERÍSTIQUES DE LA ZONA

Per a fer aquesta tesina, s'ha agafat com a zona d'estudi la mina El Machorro. Es tracta d'una de les dues mines en actiu a la zona de l'Alto Tajo que pertany a l'empresa CAOBAR S.A, empresa fundada l'any 1964 amb finalitat de ser una de les millors en la producció de minerals i que explota la mina des de l'any 1998.

Aquesta va introduir, mitjançant el mètode GeoFluv i el software Natural Regrade, principis geomorfològics i hidrològics amb l'ajuda del grup d'investigació en Restauració Geomorfològica de la UCM. Així, al 2012 i 2014 van començar les actuacions de restauració a una part de la mina.

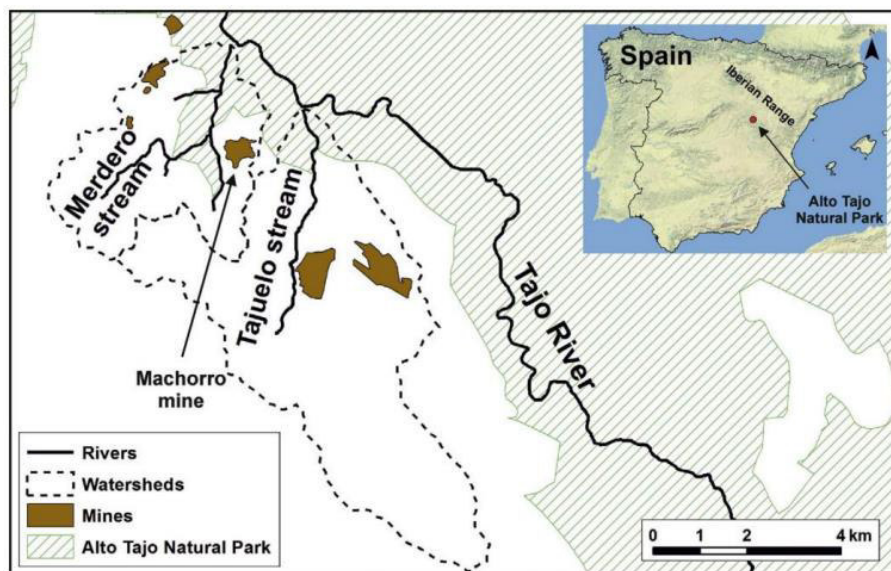


Figura 9. Localització de les zones minades a la vora del Parc Natural de l'Alto Tajo.

Es situa a la Zona Perifèrica de Protecció (ZPP) del Parc Natural de l'Alto Tajo, en el terme municipal de Poveda de la Sierra, a Guadalajara. Es tracta d'una mina encara activa a cel obert, que està situada en una vessant de gran pendent i longitud.

3.1.1 Medi físic

Declarat l'abril del 2000 (Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, n.d.) el Parc Natural del Tajo es troba entre la província de Guadalajara i el nord-est de la de Conca, agafant 36 municipis de la primera i 2 de la segona. Té una superfície de 105.721 hectàrees, amb una àrea perifèrica de protecció de 70.544 hectàrees (Diputación de Guadalajara, n.d.),

convertint-se en el Parc Natural més extens de la comunitat de Castella-la Manxa i un dels espais protegits amb més superfície d'Espanya (Carcavilla, 2006).

En aquest Parc hi destaquen la majoria de les característiques típiques de la Serralada Ibèrica i destaquen les formes vinculades a les lleres com canyons i terrasses, així com formes singulars de vessants (*Parque Natural Del Alto Tajo En España | Spain.Info En Español*, n.d.). Els valors més destacats d'aquest són la qualitat de les aigües dels seus rius i les excel·lents poblacions d'espècies de fauna lligades al medi fluvial, així com el bon estat de conservació de les diferents formacions vegetals ripàries i de flora aquàtica (Martín Duque et al., n.d.).



Figura 10. Situació del Parc Natural d'Alto Tajo. Font: Archivo:Situation Map of Alto Tajo Natural Park.Png - Wikipedia, La Enciclopedia Libre, n.d.

El paisatge del Parc és un dels recursos naturals més importants que té. Aquest, està caracteritzat per ser molt natural, per l'alta presència de massa forestal i per un relleu accidentat (Gómez Orea & Rubio Blanco, 2000). Hi podem trobar diferents unitats ambientals i paisatgístiques, com cursos fluvials, boscos, gorges o espais oberts. Tots aquests ecosistemes tenen en comú els elements geològics, la flora, la fauna i els paisatges que conformen tot el conjunt del Parc i que veurem amb més detall a continuació.

3.1.2 Flora

Al Parc existeixen 27 tipus de comunitats vegetals diferents incloses en el Catàleg Regional d'Habitats de Protecció Especial, i 18 tipus addicionals que, per la seva raresa o valor comarcal, es cataloguen a l'àmbit del Parc (Aznar Bellver & Estruch Guitart, 2011). Es

característic de tenir una gran diversitat florística, ja que dins de la seva regió es troben un 20% del total de les espècies que hi trobem a la flora ibèrica (Ibáñez Martínez, n.d.).

Hi podem diferenciar quatre subzones en la seva composició florística (*Vegetación Alto Tajo*, n.d.):

- Vegetació ripícola: és la pròpia de les vores dels rius. Aquí hi trobem com a espècies més representatives el pollancre, fleixos, salzes i om, que són totes espècies caducifòlies.
- Vegetació de vessant: més característica en zones amb pendent. Com a espècie més dominant es troba la pinassa
- Vegetació rupícola: assentada als tallats.
- Vegetació de parameres: a les parts altes dels talls.

També podem dividir les grans unitats de vegetació de la següent manera (Gómez Orea & Rubio Blanco, 2000):

- Al nord domina el paisatge amb pinedes de pi roig sobre gresos vermells.
- Al sud hi trobem pi silvestre amb sotabosc de savina rastrera.
- A l'est pinedes de pi roig amb estepa i escabonals.
- A l'oest hi trobem una zona dominada per pinedes de pi blanc i romerals.
- Al centre, erm de savina albar, alterant amb alzines, roures de fulla i pinedes.
- Finalment, associats als canons i formacions produïdes per efecte de les lleres fluvials: comunitats ripàries, rupícoles i glerícoles.

3.1.3 Fauna

El Parc està situat, com s'ha dit, al Sistema Ibèric, condicionat per uns hiverns freds i amb precipitacions moderades i un estiu sec però bastant fresc (*Fauna Del Parque Natural Del Alto Tajo*, n.d.).

La fauna que hi trobem present constitueix un gran motiu per considerar aquest espai natural com una zona d'especial protecció. Hi trobem la majoria de les espècies predadores existents a la Península Ibèrica, encara que la densitat d'aquestes és baixa (*Fauna Alto Tajo*, n.d.).

Hi trobem diferents ecosistemes representatius, des del punt de vista faunístic (*Fauna Del Parque Natural Del Alto Tajo*, n.d.):

- Parets rocoses i farallons: els protagonistes d'aquests ecosistemes són les aus rupícoles. També s'han vist últimament ramats de cabra salvatge.

- Boscós: aquesta zona és lloc de cria i alimentació de moltes espècies animals. Hi viuen quantitat d'aus i mamífers com guineus, gats salvatges, àligues,... .
- Cultius, matolls oberts i pasturatge: en aquests paisatges hi trobem diferents aus i mamífers com perdius i conills.
- Cursos d'aigua i aiguamolls: a les aigües de la zona hi trobem truites, crancs de riu i llúdrigues, entre altres.

El Parc compta amb un total de 1999 espècies de vertebrats. D'aquests, 129 estan al Catàleg d'Espècies Amenaçades, com l'àliga perdiguera i el desmà, en perill d'extinció. Si parlem d'invertebrats, el Parc té 9 espècies del Catàleg Regional d'Espècies Amenaçades, així com 4 invertebrats aquàtics de raresa local (Aznar Bellver & Estruch Guitart, 2011).

3.1.4 Geologia i geomorfologia

L'Alto Tajo destaca per la seva gran diversitat, en quant a geologia. La importància dels aspectes geològics ja va ser manifestada al Pla d'Ordenació dels Recursos Naturals, on es van identificar més de 125 punts d'interès geològic repartits pel territori de l'espai natural protegit (Carcavilla et al., 2008).



Figura 11. Barranc de la Virgen de la Hoz. Font: El Parque Natural del Alto Tajo (Ibáñez Martínez, n.d.).

Les formes que es poden veure estan clarament vinculades als cursos fluvials: canyons, gorges, cascades, salts d'aigua... També la morfologia càrstica, amb abundants dolines, simes i coves... (Gómez Orea & Rubio Blanco, 2000).

És una zona amb una gran quantitat de tipus de roques, de diferents edats, així com diversitat de formes de relleu, fòssils, minerals, estructures tectòniques...

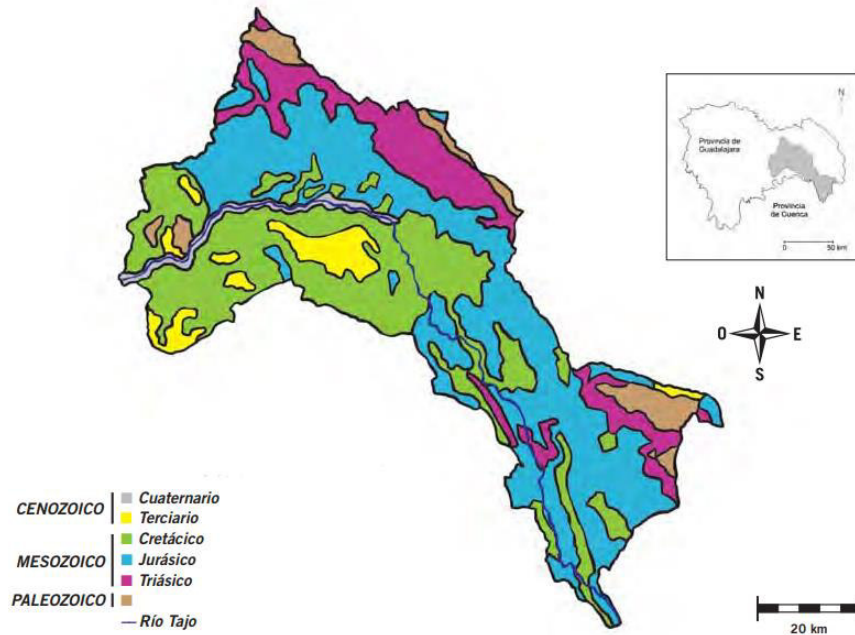


Figura 12. Mapa geològic de síntesis del Parc Natural. Font: *Guía Geológica del Alto Tajo* (Carcavilla et al., 2008).

Al mapa superior hi podem observar tres grans eres geològiques, de més antiga a més nova: Paleozoic, Mesozoic, Cenozoic, que es distribueixen segons aquest indica. Tenim:

- **Roques del Paleozoic:** aquesta és la zona menys abundant i es troba en sectors molt puntuals al nord i sud-est del Parc. Es tracta de les roques més antigues i són principalment pissarres i quarsites. També es pot trobar algun petit aflorament volcànic.
- **Roques del Mesozoic:** són les més abundants i es poden dividir en tres subgrups, segons la seva edat:
 - Roques del triàsic: es tracta principalment de gres i conglomerats en les quals l'erosió ha creat canyons fluvials i morfologies diverses. També hi trobem argiles amb guix en el fons de molts valls.
 - Roques del Juràssic: la majoria son dolomies i calcàries. El riu Tajo ha creat en aquestes grans canyons.
 - Roques del Cretaci: bàsicament son gresos caolinífers que suposen un gran recurs econòmic de la zona.
- **Roques del Cenozoic:** són les que menys abunden. Es poden distingir:
 - Roques del Terciari: la majoria d'aquestes són sorres i conglomerats.
 - Roques del Quaternari: principalment travertí.

També és destacable la diversitat geomorfològica que hi trobem en aquesta zona. Es poden veure gran varietat d'elements de terreny amb diferents orígens: acció fluvial, dissolució de

roques, repetició de cicles de gel-desgel... que acaben formant llacunes, coves, dolines, canyons, erms...

3.1.5 Clima

La localització de l'Alto Tajo, a la part central del Sistema Ibèric, determina el seu clima: temperatures baixes, precipitacions moderades i un ambient de certa continentalitat (Gómez Orea & Rubio Blanco, 2000). Els hiverns són llargs i s'agafen temperatures molt baixes, sent de les més baixes del país i, el període de calor és relativament curt, agafant com a màxim els mesos de juliol i agost.

Les temperatures van disminuint a mesura que l'altitud puja d'oest a sud-est. En el cas de les precipitacions, és invers, augmenten a mesura que l'altitud és major. Aquest gradient defineix molt bé el clima, que varia des d'humit en el sector més sud-est a sec en el nord i oest (Pérez Fernández, 2005).

3.1.6 Hidrologia

Com s'ha parlat abans, molts dels paisatges que veiem al Parc han sigut creats pels rius i afluents que hi ha en ell i, la bona qualitat d'aquestes ha permès la creació de grans hàbitats per a diferents espècies.

La xarxa fluvial està formada principalment pel riu Tajo, des de quasi el seu naixement a les zones més altes, fins els seus afluents, que són els rius Cabrillas, Gallo i Abanquejo. El règim hidrològic del riu Tajo és pluvio-nival, és a dir, de cabals permanents (*Caracterización Reserva*, n.d.). Es tracta d'un riu amb cabals grans, amb salts, ràpids, recessos i amb molta roca on hi trobem gran deposició de calcària, que sabem que és abundant en el Parc.

3.2 RESTAURACIÓ GEOMORFOLÒGICA DE LA MINA

A l'entorn de l'Alto Tajo hi trobem diverses mines de caolí. Es tracta d'un material d'elevat potencial erosiu i amb un gran impacte negatiu sobre la xarxa fluvial d'aquesta zona ecològica.

La restauracions que s'havien fet a la mina tenien com a finalitat principal ocultar els fronts d'explotació i el forat miner mitjançant la construcció de terrasses a diferents nivells i talussos de gran pendent, per intentar reduir l'impacte visual de la mina (Martín Moreno, 2013). Aquest mètode de restauració incloïa un sistema de drenatge amb cunetes i bales de decantació per retenir sediments. La majoria d'aquests sediments provenien d'abocadors de residus malament recuperats (Zapico et al., 2018).

Més endavant, a partir del 2012, la mina va optar per una restauració geomorfològica on, a més de voler restaurar la forma del relleu, s'intentava recuperar l'equilibri de la dinàmica erosiva-sedimentària. Els pendents còncavs naturals inclouen una xarxa de drenatge, i es tracta de xarxes còncaves en 3D, no només en 2D (Zapico et al., 2018). Per dissenyar i construir aquestes formes del terreny, que tenen una certa dificultat, es va usar el mètode Geofluv, juntament amb el software Natural Regrade.



Figura 13. Foto aèria de la mina El Machorro. (a) cel obert; (b) abocador de residus no recuperats; (c), estanys; R1, R2 i R3: terrasses de col·luvions carbonatats; R4: recuperació geomòrfica mitjançant Geofluv-Natural Regrade; (ER): abocador de residus de recuperació minera experimental.

La zona restaurada és la R4 de la figura anterior i es tracta d'una xarxa de drenatge amb canals funcionals i vessants còncaves i convexes. Els dos canals restaurats es troben situats a una zona on la quantitat d'escolament que es pot introduir dins és molt petita, ja que tenen la seva capçalera al costat d'un mur de contenció (Zapico et al., 2018). Les seves dimensions estan dissenyades per adaptar aquesta descàrrega a la capçalera i per afegir la descarrega addicional que es donarà en direcció de baixada deguda a tot el material que pot entrar al llarg dels vessants de la vall. A la imatge següent es poden veure les dues subconques dissenyades amb el mètode Geofluv i que, posteriorment, s'han seguit estudiant per dur a terme un control.



Figura 14. Restauració geomorfològica a la mina El Machorro dels anys 2012 i 2014. Foto: DGDRONE (2015).

Concretament, les formes de relleu dissenyades consten de:

- Canals tipus A: tenen pendents entre un 4% i un 10% i un patró zig-zag de sinuositat menor a 1,2 i de material argilo-arenós.
- Canals tipus Aa+: aquests tenen un pendent major al 10 % i, igual que els anteriors, tenen un patró zig-zag de sinuositat menor a 1,2 i de material argilo-arenós.
- Interfluvis arrodonits els quals les seves vessants estan compostes per crestes de subconques i cunetes.

Finalment, es va completar la restauració amb una substitució de sòls i revegetació. El material extret de la zona d'exploració minera es va usar per a la recuperació de la capa vegetal. Posteriorment, es va sembrar la superfície amb una barreja d'arbustos i herbàcies (Zapico et al., 2018).

3.3 EROSIÓ

De la restauració feta i descrita per Zapico et al. (2018) s'han extret una sèrie de topografies per a diferents anys entre el 2012 i el 2018, sortides a partir de diferents mètodes de monitoreig. Per exemple, la topografia de l'any 2012 on l'estat de la restauració és intacte, és a dir, que no ha patit cap erosió, es va reconstruir fent una interpretació experta de l'escaneig fet l'any 2015.

Així doncs, amb la finalitat de saber l'erosió que va patir la restauració del Machorro, s'han calculat les diferències entre topografies dels diferents períodes: 2012-2015, 2015-2017 i 2017-2018. Un cop calculades s'ha fet la suma, obtenint així el total de metres erosionats

arreu de la conca. Els resultats es mostren a continuació, de color blau tota la zona erosionada i en blanc aquelles parts on no hi ha erosió.



Figura 15. Diferència dels DEM de 2012 i 2015.

L'erosió observada per a aquest primer període es va produir majoritàriament al canal principal generant una incisió més pronunciada d'aquest, sobretot al tram mig i al tram final on es veu una erosió que arriba als 0,7 m.

Tal i com s'esmenta a l'article "*Geomorphic reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites The Alto Tajo Natural Park Spain*", aquests valors van ser més elevats dels esperats i es creu que va ser degut a:

- Una construcció de la restauració no exacta (comparada amb el disseny creat)
- La vegetació no va créixer adequadament els dos primers anys i no es va arribar als valors esperats de coberta vegetal



Figura 16. Diferència dels DEM de 2015 i 2017.

En aquest segon període es veu una notable disminució de l'erosió generada, sense incisions continuades al canal principal, sinó més puntuals al tram central i cap a la zona final d'aquest.

Segons Zapico et al. (2018), els valors tan baixos d'erosió es deuen a una actuació que es va fer per compensar els errors observats al període anterior:

- Es van fer uns ajustaments a la base de la restauració
- La cobertura vegetal va superar el 30% de la superfície.

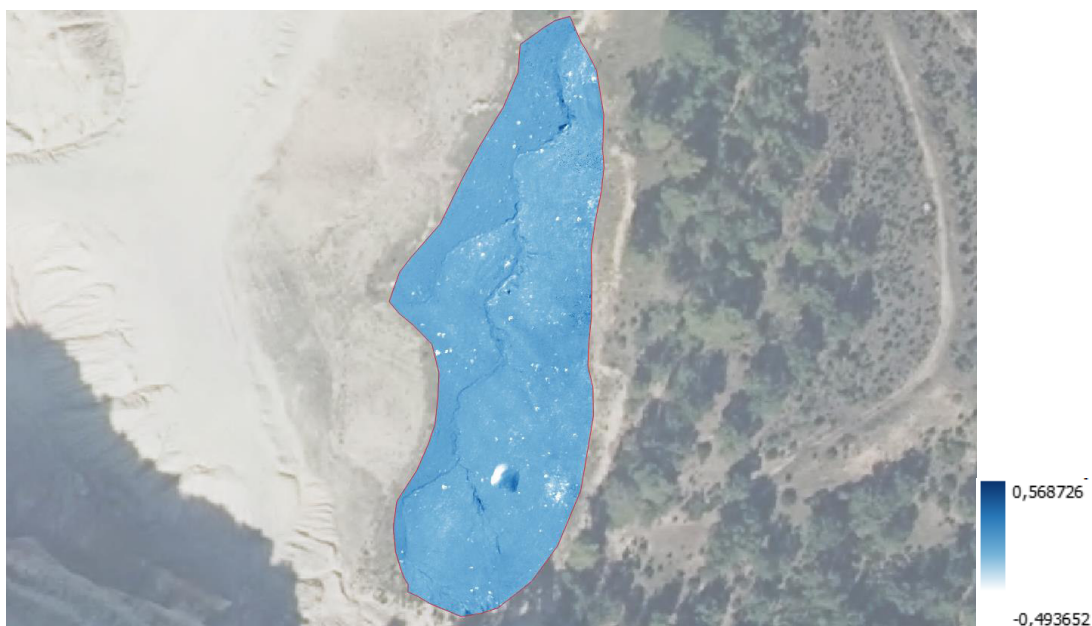


Figura 17. Diferència dels DEM de 2017 i 2018.

Per a l'últim període, de 2017 a 2018, s'observa erosió a tota la conca, encara que de menor grau, amb el màxim al tram final del canal principal, coincidint amb una de les zones de més erosió als altres dos períodes.



Figura 18. Erosió total per al període 2012-2018.

Així doncs, sumant les erosions dels tres períodes, obtenim l'erosió total que es va donar entre els anys 2012 i 2018, com es mostra a la Figura 18.

Es veu de manera molt clara que predomina la forma de l'erosió donada al primer període de temps (2012-2015):

- La màxima erosió es dona al canal principal amb un màxim d'aproximadament 1 m a la final d'aquest i del voltant de 0,8 a la part central.
- La part alta de la conca (part inferior de la figura) també pateix una erosió, encara que menor, d'uns 0,35 m.

4. CONSTRUCCIÓ DEL MODEL

En aquest apartat es descriu la definició del model hidrològic que s'ha dut a terme a la mina el Machorro amb Iber. La formulació bàsica que usa aquest model s'ha descrit a l'apartat 2.3 del present document.

4.1 DEFINICIÓ GEOMÈTRICA

El primer pas per crear un model a Iber és definir la geometria de la zona d'estudi. En aquest cas, es partia d'un arxiu amb la geometria estreta de la restauració.

Per tant, s'ha importat la geometria al programa i s'ha carregat una ortofoto de la zona, descarregada del Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica, per poder visualitzar de manera més clara la zona que s'està estudiant.

Per assegurar que la geometria està ben carregada i que no hi hagi punts o línies duplicats, es col·lapsa el model amb la tolerància per defecte de 0,01 m.



Figura 19. Superfície que defineix la zona d'estudi.

A continuació, es defineixen les condicions de contorn i inicials. La condició inicial del problema vindrà donada d'assumir que tota la zona està seca inicialment, és a dir, que hi ha un calat nul. I la condició de contorn que s'usarà serà únicament de sortida. Per evitar errors, es ficarà la sortida en tot el contorn de la conca d'estudi, que serà de tipus calat crític, per no generar afeccions des d'aigües avall.



Figura 20. Definició de la condició de contorn de sortida del problema.

Per indicar l'ús del sòl de la zona, s'assigna la rugositat a través del coeficient de rugositat de Manning. Per a aquest cas, donat que es tracta de terra amb poca vegetació i, en cas d'haver-hi, és vegetació curta, s'ha usat un coeficient de 0,022.

S'ha decidit usar una malla no estructurada d'elements triangulars i de 0,5 de mida, generant així un total de 45800 elements. Un cop generada, es creua amb el model d'elevació del terreny de la restauració per a l'any 2012, eliminant aquells elements que queden fora de l'àrea d'aquest i que podrien generar problemes a l'hora de visualitzar els resultats.

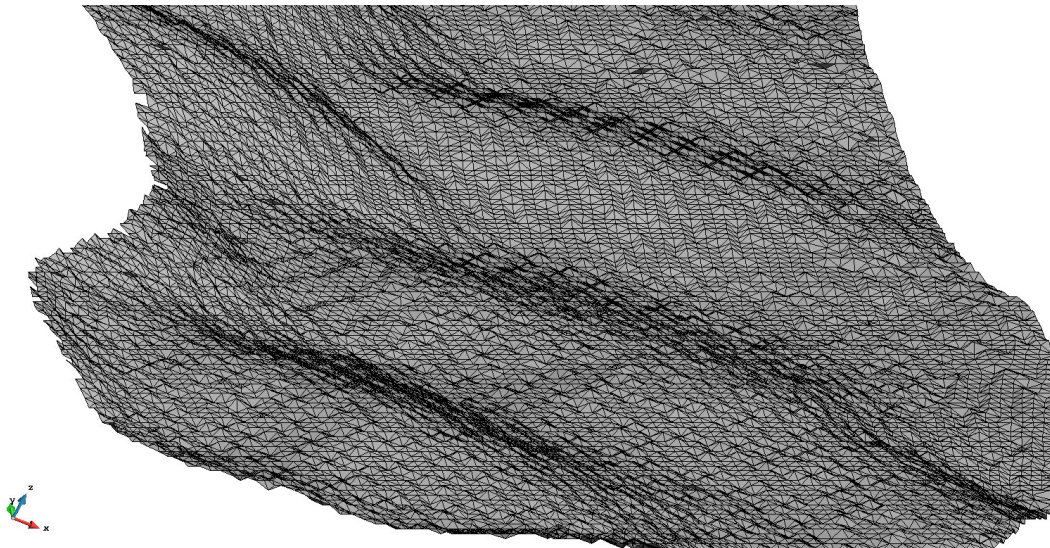


Figura 21. Detall de la malla.

4.1 INFILTRACIÓ

Com s'ha esmentat, un dels processos més importants que inclou el mòdul d'hidrologia és la infiltració de l'aigua al terreny. Per la seva simplicitat, s'ha aplicat el model d'infiltració de l'SCS per tenir en compte les pèrdues al terreny per infiltració. En aquest, es defineix la capacitat màxima de retenció del sòl, en mm, amb la següent expressió:

$$S(mm) = \frac{25400}{CN} - 254$$

on *CN* és el Número de Corba i es defineix a partir del tipus de sòl, usos del sòl i pendent del terreny.

Per tant, ho primer és classificar el terreny de la restauració segons els grups hidrològics que ens defineix l'SCS.

Grup hidrològic del sòl	Infiltració quan està molt humit	Característiques	Textura
A	Ràpida	Alta capacitat d'infiltració > 76 mm/h	Sorrenca Sorrenca-llimosa
B	Moderada	Capacitat d'infiltració 76-38 mm/h	Franca Franco-argilosa-sorrenca Franco-llimosa
C	Lenta	Capacitat d'infiltració 36-13 mm/h	Franco-argilosa Franco-argilo-llimosa
D	Molt lenta	Capacitat d'infiltració < 13 mm/h	Argilosa

Taula 1. Grups hidrològics del sòl segons l'SCS.

Campos Moreno (2016) fa a la seva tesina un anàlisi mecànic amb el mètode de la pipeta de Robinson on classifica el sòl de la restauració del present treball i la restauració adjacent. Els resultats que obté són els que es mostren a la taula següent, segons les quatre zones definides:

Muestra N°	Peso Muestra (grs.)	Arena Total Americana 2 - 0,05 mm.	Arena M. Gruesa 2 - 1. mm.	Arena Gruesa 1 - 0,5 mm.	Arena Media 0,5 - 0,2 mm.	Arena Fina 0,2 - 0,1 mm.	Arena Fina 0,1 - 0,05 mm.	Limo ISSS 0,02 - 0,002 mm.	Arcilla < 0,002 mm.	Area M. Fina 0,05 - 0,02 mm.	Limo + Ar. M. Fina (limo Americ) 0,05 - 0,002 mm.	Arena Total ISSS 2 - 0,02 mm.	Clasificacion Textural (USDA)
A	224,675	71,488	92,072	91,396	77,497	80,519	73,360	47,217	73,203	19,26%	35,39%	63,89%	Franco
	205,149	62,772	91,446	90,097	74,864	78,118	71,601	47,066	73,113				
	19,53	44,64%	3,21%	6,65%	13,48%	12,30%	9,01%	16,13%	19,97%				
B/C	228,704	72,292	92,102	91,539	77,989	81,520	73,043	54,785	50,196	13,14%	26,82%	64,28%	Franco Arcillo Arenoso
	208,965	62,197	91,441	90,096	74,866	78,088	71,600	54,634	50,099				
	19,74	51,14%	3,35%	7,31%	15,82%	17,39%	7,31%	13,68%	22,04%				
D	227,915	72,275	92,840	92,749	78,234	80,224	73,114	52,005	50,288	9,74%	23,15%	65,08%	Franco Arcillo Arenoso
	208,154	61,339	91,450	90,095	74,867	78,157	71,600	51,857	50,193				
	19,76	55,34%	7,03%	13,43%	17,04%	10,46%	7,66%	13,41%	21,51%				
REF	231,025	76,717	92,318	92,503	79,228	81,777	73,143	66,689	49,801	13,24%	17,20%	81,28%	Franco Arenoso
	212,061	63,814	91,437	90,087	74,867	78,066	71,600	66,608	49,735				
	18,96	68,04%	4,65%	12,74%	23,00%	19,57%	8,14%	3,95%	14,76%				

Taula 2. Textures del sòl. Font: Campos Moreno (2016).

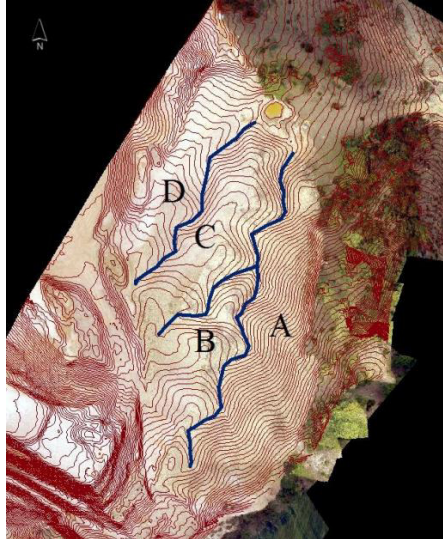


Figura 22. Zones definides per a la classificació del terreny de la mina segons (Campos Moreno, 2016).

La restauració que s'estudia en el present treball és la del 2012, que correspon a les zones A, B i C, és a dir, a textures del sòl franca i franco-argilo-arenosa. Si fem un cop d'ull a la taula de grups hidrològics del sòl mostrada anteriorment, el podem classificar com a tipus B.

Un cop es té això, s'ha d'obtenir el valor del Número de Corba. L'SCS va tabular aquests valors en funció de l'ús de sòl, el grup hidrològic del sòl i el pendent del terreny.

S'ha escollit un valor CN = 86, que correspon al guaret, per a un pendent major al 3%, ja que quan es va fer la restauració, la coberta vegetal d'aquesta era nul·la.

El programa defineix també l'abstracció inicial, que és un percentatge de la capacitat màxima de retenció S , com:

$$I_a = \alpha \cdot S$$

Si es segueix la implementació clàssica del mètode del Número de Corba, el valor d' α és de 0,20. Encara que s'ha trobat que en molts casos les pèrdues inicials són menors, per a aquest treball s'ha decidit deixar el valor predeterminat de 0,20.

A partir d'aquests valors, Iber calcula la precipitació neta acumulada a cada instant com:

$$P_n = \frac{(P - \alpha S)^2}{P + (1 - \alpha)S} \quad P > \alpha S$$

on P és la profunditat de precipitació bruta acumulada. Això, però, només serà vàlid quan $P > I_a$ i, en cas contrari, la precipitació neta serà igual a zero.

La infiltració acumulada, F , es calcula, per a cada pas de temps, com la diferència entre la precipitació neta i la bruta. Finalment, a partir d'aquesta infiltració acumulada en dos passos de temps, es calcula la taxa d'infiltració:

$$f = \frac{F_{(t+\Delta t)} - F(t)}{\Delta t}$$

4.2 PRECIPITACIÓ

L'altre procés que és molt important és la precipitació ja que serà el que ens generarà erosió. Per tenir una primera simulació, s'ha definit una pluja de disseny partint de la dada de precipitació diària màxima usant un mètode gràfic. Aquest es basa en el document "Máximas lluvias diarias en la España Peninsular", publicat l'any 1999 per la Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento en col·laboració amb el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

La finalitat d'aquest document és presentar un mètode útil que proporcioni valors fiables de pluges diàries màximes, i la metodologia que segueix és la de fer servir plànols i taules, inclosos en el document esmentat. El procediment seguit és el següent:

1_ Localitzar en els plànols la zona on es troba la mina:

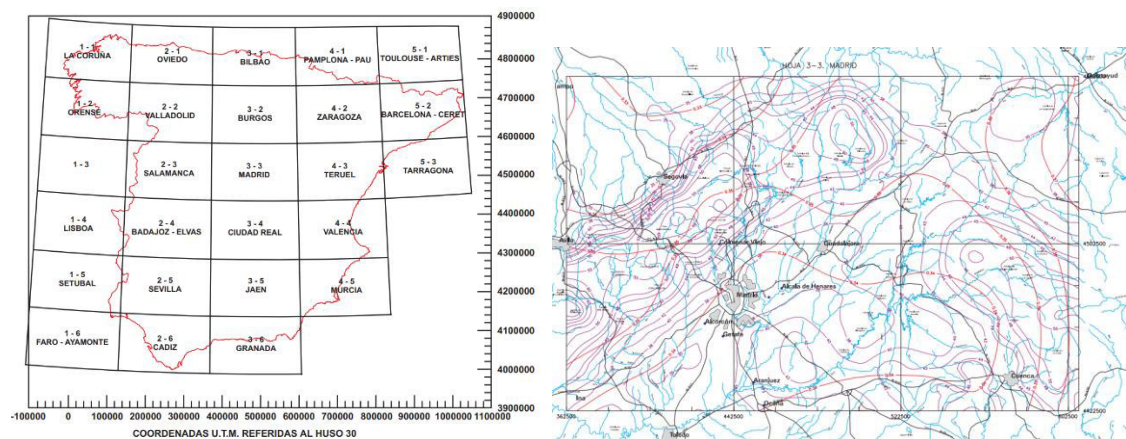


Figura 23. Plànol guia i plànol de la zona d'estudi.

2_ A partir del plànol indicat buscar, seguint les isolínies presentades, el valor de:

- Coeficient de variació, C_v , marcat de color vermell i amb valors inferiors a la unitat.
- Valor mig de la màxima precipitació diària anual, indicat de color lila.

El Machorro es troba indicat amb una creu a la figura que es mostra a continuació. Li correspon un valor del coeficient de variació de 0,35 i un valor de 47 mm per a la màxima precipitació diària anual.

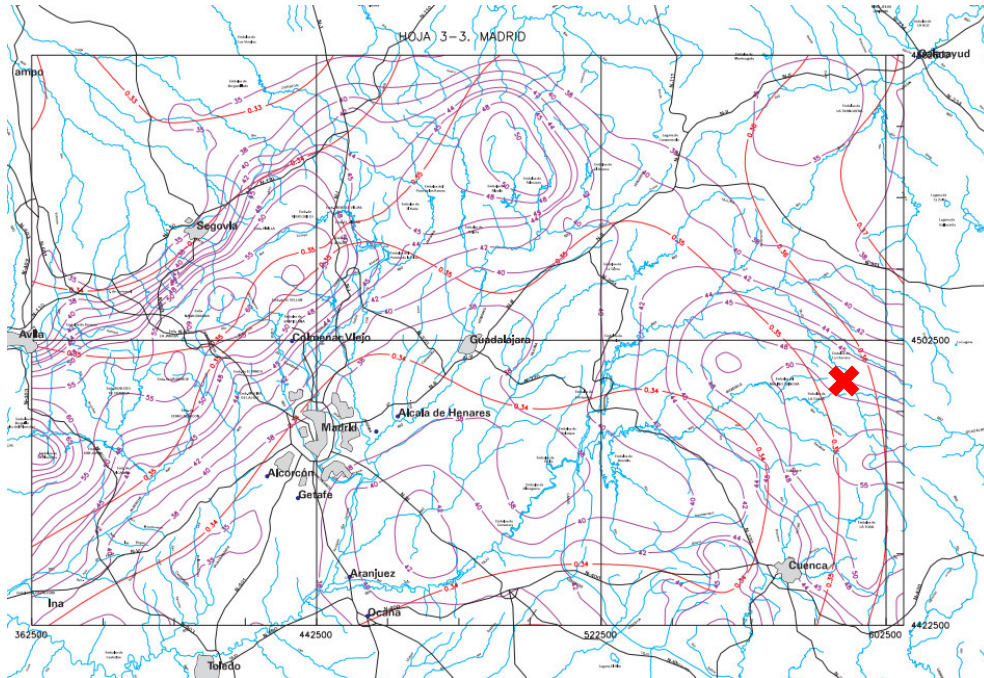


Figura 24. Plànol "Hoja 3-3. Madrid".

3_ A partir d'aquests valors, es treu el valor del factor d'amplificació K_T , mitjançant una taula adjunta al document:

T (anys)	2	5	10	25	50	100	200	500
C_v	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
K_T	0,921	1,217	1,438	1,732	1,961	2,220	2,480	2,831

Taula 3. Factor d'amplificació, K_T .

4_ L'últim pas per trobar el valor de la precipitació diària màxima és fer el producte del factor d'amplificació, corresponent a cada període de retorn, pel valor mig de la màxima precipitació diària anual.

T (anys)	2	5	10	25	50	100	200	500
K_T	0,92	1,22	1,44	1,73	1,96	2,22	2,48	2,83
P_d (mm)	43,24	57,20	67,59	81,40	92,17	104,34	116,56	133,06

Taula 4. Valors de P_d per als diferents períodes de retorn.

Aquest valor es multiplica per l'anomenat coeficient de simultaneïtat K_A que serà igual a 1, perquè la conca és menor a 1 km², obtenint així el valor de precipitació diària P_d' que s'usarà per a la construcció del hietograma.

El mètode que se sol usar es basa en les corbes intensitat – durada – freqüència (corbes IDF). La obtenció d'aquestes és possible a partir de l'anàlisi de tempestes enregistrades amb pluviògrafs i a la Península s'acostuma a fer servir les corbes proposades per Témez (ACA, 2003):

$$\frac{I}{I_d} = \left(\frac{I_1}{I_d}\right)^{\frac{(28^{0,1}-D^{0,1})}{(28^{0,1}-1)}}$$

on I és la intensitat de precipitació per a una durada efectiva de la pluja de D hores corresponent al període de retorn considerat, expressada en mm/h, I_1 la intensitat horària per al mateix període de retorn considerat, és a dir, la precipitació per a una durada efectiva de la pluja d'una hora, expressada en mm/h, I_d la intensitat mitjana diària o la precipitació per a una durada d'un dia, expressada en mm/h i D la durada efectiva de la pluja per a la qual es vol calcular la intensitat I , expressada en hores.

El quocient $\frac{I_1}{I_d}$ és un valor característic de la zona d'estudi. Per saber el seu valor s'ha consultat el visor del Sistema de Informació Geogràfic de Carreteras:

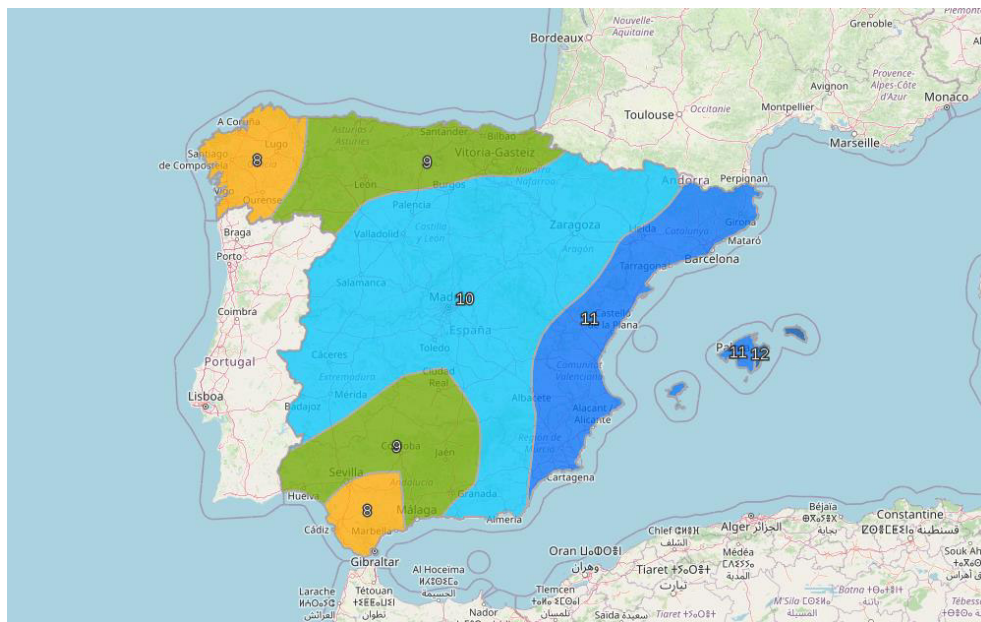


Figura 25. Valors del quocient I_1/I_d per a la Península.

Per tant, ens quedaria la fórmula següent:

$$\frac{I}{I_d} = (10)^{\frac{(28^{0,1}-D^{0,1})}{(28^{0,1}-1)}}$$

A partir d'aquesta, es pot construir la corba de la figura que es mostra seguidament. Seguint les recomanacions que l'Agència Catalana de l'Aigua descriu a les seves "Recomanacions

tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local" s'ha considerat una pluja amb una durada efectiva de 24 hores.

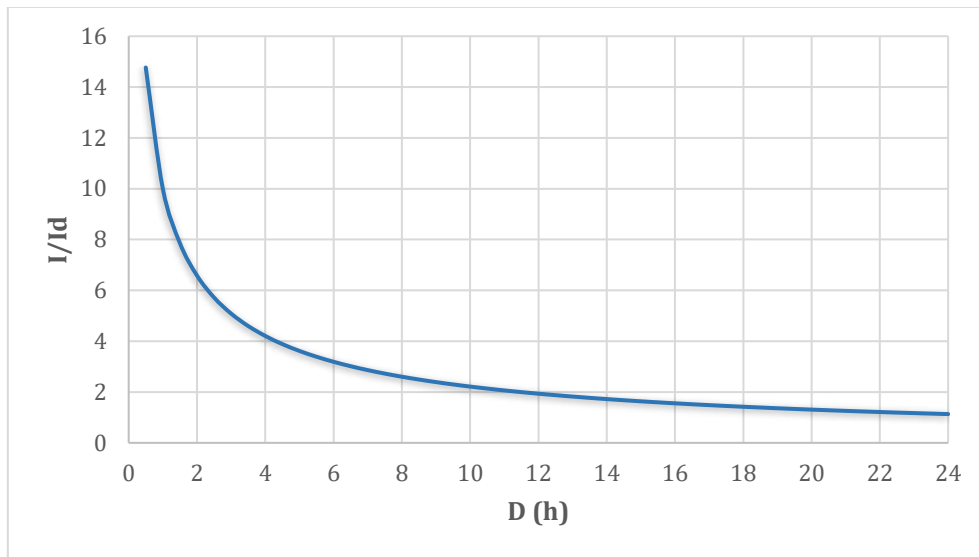


Figura 26. Corba IDF aplicable a la zona d'estudi.

Sabem que la intensitat diària I_d és la intensitat per a una durada efectiva de pluja de 24 hores, és a dir:

$$I_d = \frac{P_d}{24}$$

on P_d és la precipitació diària expressada en mm, calculada anteriorment per a diferents períodes de retorn.

Per treure el hietograma de precipitació s'aplicarà el mètode conegut com a blocs alternats, a partir de la corba IDF i el valor de P_d . Abans, però, és necessari el càlcul de la pluja neta ΣE utilitzant el model de l'SCS, ja que es necessari conèixer el valor del llindar d'escorrentiu P_0 . Aquest es treu a partir del número de corba, explicat a l'apartat 4.1, més endavant en aquest document.

$$P_0 = \frac{5000}{NC} - 50 = \frac{5000}{86} - 50 = 8,14 \text{ mm}$$

La pluja neta es calcula a partir de l'expressió següent:

$$\Sigma E = \frac{(\Sigma P - P_0)^2}{\Sigma P + 4P_0} \quad \text{si } \Sigma P > P_0$$

A continuació s'adjunten els hietogrames calculats per als diferents períodes de retorn que s'han usat:

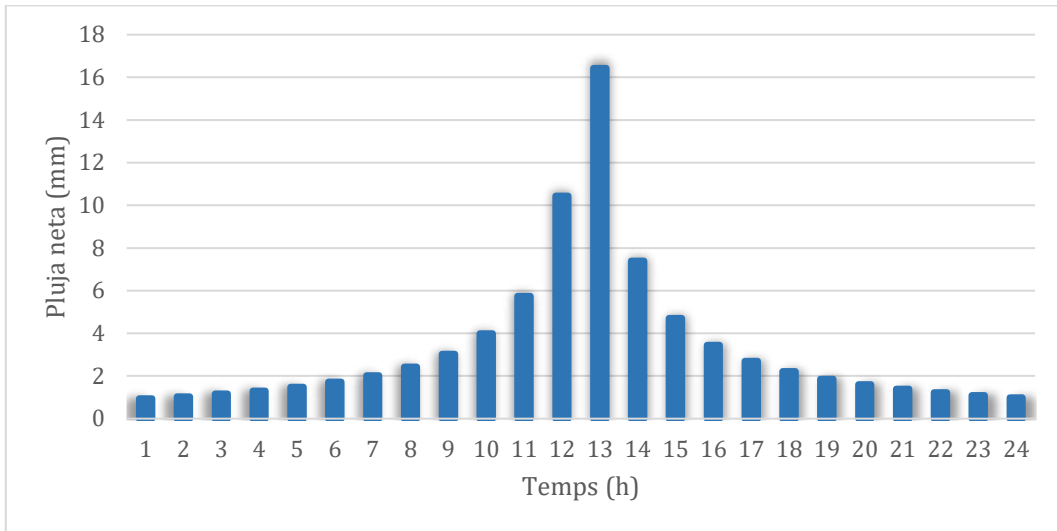


Figura 27. Hietograma de pluja neta per a un període de retorn de 100 anys.

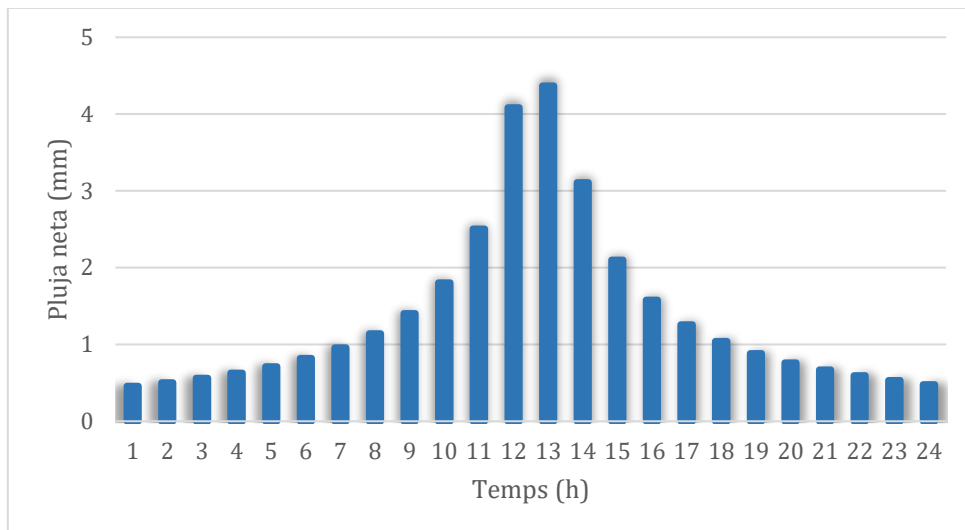


Figura 28. Hietograma de pluja neta per a un període de retorn de 5 anys.

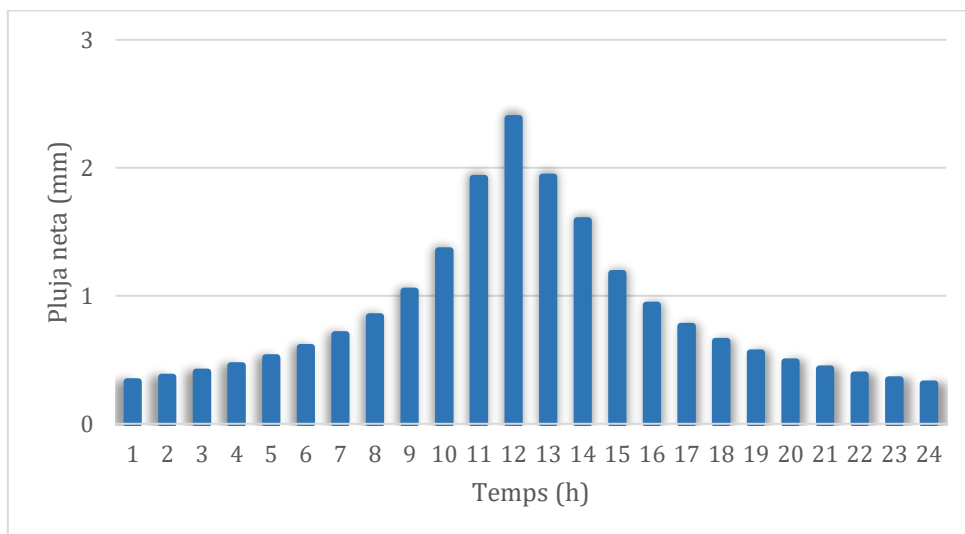


Figura 29. Hietograma de pluja neta per a un període de retorn de 2 anys.

4.3 DADES GENERALS DE CÀLCUL

En aquest apartat es defineixen totes aquelles dades del problema que tenen a veure amb la seva realització.

4.3.1 Paràmetres de temps

Els paràmetres de temps s'han definit de la següent manera:

- Temps de simulació: 90000 segons, ja que és la durada de la precipitació usada.
- S'ha decidit usar un interval de resultats de 3600 segons, per obtenir un mapa de resultats per hora.

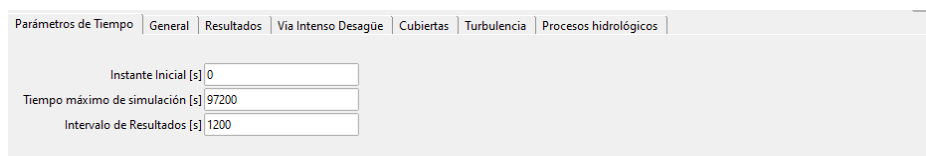


Figura 30. Pestanya de Paràmetres de temps.

4.3.2 General

A la següent pestanya que hi trobem canviem l'esquema numèric a *DHD basin*, ja que ens donarà resultats numèricament més estables. En aquest esquema l'altura de làmina en els fronts sec-mullat es calcula mitjançant una interpolació lineal de la cota d'aigua a l'element mullat i la cota del terreny a l'element sec. És recomanable l'ús d'aquest esquema o del *DHD* quan es necessita la transformació pluja-escorrentiu en la totalitat de la conca a estudiar.

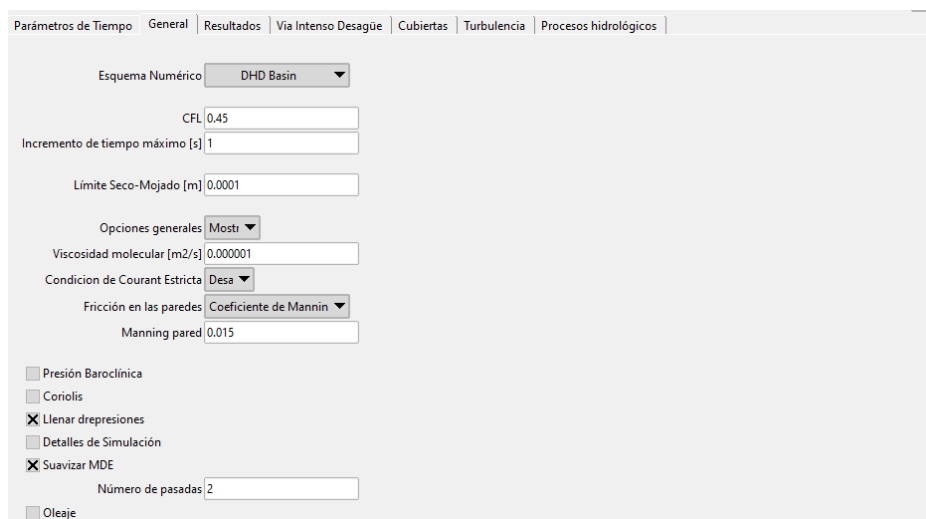


Figura 31. Pestanya de General.

S'ha canviat el valor del límit sec-mullat a 0,1 mm (0,0001 m) ja que és el valor recomanable quan es duen a terme càlculs amb models hidrològics. Es marquen les caselles d'omplir

depressions i suavització del model d'elevacions i la resta es deixa amb els valors per defecte.

5. COMPARACIÓ DE RESULTATS

En aquest apartat es troben els resultats extrets de fer diferents simulacions amb Iber. S'han fet un total de 3 simulacions que corresponen a les tres pluges de disseny esmentades anteriorment.

La idea serà comparar aquests resultats, d'una manera qualitativa, amb l'erosió real (Figura 32) que va patir la zona restaurada al Machorro amb la finalitat de veure si Iber és capaç de simular la tendència erosiva de la zona.



Figura 32. Erosió real de la restauració per al període de 2012 a 2018.

Donat a que el temps de càlcul de models d'aquest tipus és força elevat i requereix de gran potència computacional, s'ha optat per comparar les erosions observades en un període molt llarg de temps (de 2012 a 2018) amb un únic episodi de pluja (per a cada període de retorn). D'aquesta manera s'està mirant si és possible obtenir una pluja amb un efecte equivalent al conjunt d'esdeveniments donats durant el període de temps esmentat.

Doncs, per portar a terme la comparació, s'han extret els mapes de màxims de les tensions de fons (N/m^2), que es poden relacionar amb l'erosió, sent màxima aquesta quant més tensió de fons hi hagi. S'ha calculat una taxa d'erosió mitjançant la formulació d'Ariathurai i Arulanandan (1978), que fa dependre l'erosió de la diferència entre tensió tangencial (τ_b) i una tensió tangencial crítica d'inici d'erosió (τ_{ce}), i també d'un valor M representatiu de la taxa d'erosió:

$$E (m/s) = M \cdot \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right)$$

El valor d'M normalment s'obté calibrant-ho a partir de dades de camp que, en aquest cas, no es tenen. Per tant, s'ha escollit un valor de 0,000001, valor de l'ordre de magnitud que ens proposa M. García (2006) al document "*Sedimentation engineering*".

La tensió crítica s'ha calculat a partir del criteri d'inici de moviment de Shields que diu que la tensió necessària per iniciar el moviment és de:

$$\frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot D} = 0,056$$

S'ha de tenir en compte, per a futurs desenvolupaments, que el criteri de Shields s'usa sobretot en cursos fluvials i no tant per vessants. Per al càlcul del diàmetre de partícula, tornem a la Taula 2, on Campos Moreno (2016) classifica la mida de les partícules de la zona de la restauració. Així doncs, ponderant els diàmetres mitjos de cada interval, s'ha agafat un diàmetre de partícula representatiu de la zona de 0,19 mm.

Un cop tenim el diàmetre, es pot treure el valor de la tensió a partir de la qual hi ha moviment de partícules i és de 0,17 N/m^2 . Amb això ja es pot calcular la taxa erosiva, amb la fórmula d'Ariathurai i Arulanandan, per a cada pas de temps simulat i, multiplicant per l'interval de temps usat (3600 segons) i sumant tot, obtindríem un valor d'erosió aproximada generada per a un esdeveniment de pluja:

$$Erosió\ total\ (m) = \sum E \left(\frac{m}{s} \right) \cdot interval\ de\ temps\ (s)$$

Per fer l'anàlisi dels resultats, s'ha dividit la conca en:

- Canal principal (blau)
- Canals secundaris numerats de l'1 al 4 (taronja)
- Zona de fora dels canals



Figura 33. Divisió de la restauració per fer l'anàlisi.

Seguidament es mostren els resultats d'erosió obtinguts per a cada període de retorn.

5.1 T = 100 ANYS

S'han començat les simulacions amb la pluja de disseny de 100 anys de període de retorn. És un esdeveniment de 24 hores amb un pic de 16 mm i un total de precipitació caiguda de 80 mm.

Com es volen comparar resultats amb l'erosió provocada per un total de 6 anys, on es sap que hi ha hagut més de 60 episodis que han generat esorrentiu, amb una pluja de 24 hores, s'ha escollit una pluja forta pensant que els resultats serien més similars o que representarien millor la realitat de la zona.

L'erosió calculada amb la metodologia esmentada anteriorment, es mostra a la Figura 34 i es poden observar les següents tendències:

Canal principal

De la figura anterior veiem com tot el canal principal pateix erosió, sent aquesta menor a la part alta de la restauració i major a mesura que es va aigües avall.

L'erosió varia des de 20 cm, a la part superior, als 3,5 m a l'últim tram del canal, trobant aquí el màxim valor. Entre els canals secundaris 1 i 3 hi ha una part del canal amb valors d'erosió que ronden els 2 metres.

Si comparem, de manera qualitativa, amb l'erosió observada de fer diferències entre els DEM dels anys 2012 i 2018, veiem que la tendència captada amb Iber és bona: tenim erosió

a tot el canal principal, amb un màxim d'aquesta al tram final i amb erosió alta entre els canals secundaris 1 i 3.

Mirant els valors obtinguts de 3 m a la part final i de pràcticament 2 a la central amb els valors reals, que són d'1 m i 0,8 m, respectivament, podem veure com la pluja de disseny usada sobreestima la incisió del canal principal.



Figura 34. Erosió calculada (m) per a l'esdeveniment de 100 anys de període de retorn.

Canals secundaris

Els quatre canals secundaris pateixen erosió. La del primer i tercer arriba als 60 cm, la del segon, la més lleu, es troba al voltant dels 40 cm i, per últim, el canal 4 és el que pateix més amb valors que arriben als 90 cm.

Si contrastem aquests resultats amb el mapa de valors reals (Figura 32), veiem que els canals 2 i 3 pràcticament no pateixen erosió. Per tant, Iber no ens estaria agafant del tot bé la tendència erosiva d'aquests dos braços secundaris del canal. En canvi, pel primer canal dona tendències molt bones, inclosa la forma exacte de l'erosió i, pel quart, els resultats també són bastant bons.

D'igual manera que passa al canal principal, els valors d'erosió que s'estimen amb la pluja de 100 anys són majors als reals: el canal 1 pateix una erosió real d'uns 0,3 m i el canal 4 es troba al voltant del mig metre. Per tant, també estaríem obtenint valors sobreestimats d'erosió als canals secundaris.

Zona exterior als canals

Segons els valors obtinguts, tota la zona que no correspon als canals dissenyats a la restauració no pateix erosió. Això no és el que s'observa dels valors reals, on pràcticament a tota la zona superior de la restauració es veu que hi ha hagut transport de material.

5.2 T = 5 ANYS

Veient els resultats del primer cas estudiat, on la tendència erosiva resultat de la simulació amb Iber no capta del tot bé l'erosió real, sobretot els canals secundaris on no hi hauria d'haver erosió, s'ha decidit usar una pluja amb un període de retorn menor.

Aquesta, també de 24 hores de durada, té un pic de 4,3 mm i en total hi cauen 32,9 mm de precipitació. Per tant, els resultats esperats són de tenir una menor erosió al conjunt de la conca i es mostren a la Figura 35.

Canal principal

Similarment al cas anterior, per a aquest esdeveniment també hi trobem una incisió a tot el canal principal que va sent major a mesura que anem aigües avall.

Els valors menors, que es troben a la part alta de la conca, són d'uns 10 cm. Els valors més alts es troben al tram final del canal principal i tenen un valor de 1,5 m (color verd més fosc de la Figura 35). A la zona central del canal, entre els canals secundaris 1 i 3 també es veuen valors alts d'entre 0,5 i 0,9 m.

Comparant aquests resultats amb l'erosió real de la zona, veiem que Iber capta bé la tendència erosiva del canal principal també per a aquesta pluja ja que seguim tenint les erosions més grans al tram final i central del canal, tal i com ha passat a la realitat.

Si mirem valors, seguim tenint una sobreestimació, encara que menor, de l'erosió del canal principal: 1,5 m al tram final per a la simulació i 1 m a la realitat; 0,9 m màxims al tram central per a la simulació i 0,8 m a la realitat.



Figura 35. Erosió calculada (m) per a l'esdeveniment de 5 anys de període de retorn.

Canals secundaris

Passem ara a mirar els canals secundaris on, recordem, per a la pluja de període de retorn de 100 anys teníem erosió a dos canals on realment no hi va haver. Per a aquest cas hi trobem una forma molt similar, amb erosió als quatre canals, amb una petita diferència al segon canal on veiem que el braç és menor.

Els valors resultants en els canals 1 i 3 són de 0,25 m; el segon canal, ara més petit, té els valors més baixos que no arriben als 0,15 m; i, finalment, el canal 4 és el que pateix més erosió, amb valors que arriben als 0,3 m.

Es pot dir que per a una pluja menor, s'aconsegueix reduir una mica els canals 2 i 3 que, com hem dit, no tenen pràcticament erosió. En canvi, el que trobem ara en els canals 1 i 4 són valors menors als reals que eren de 0,3 m al primer i 0,5 m al quart.

Mirant l'erosió del canal 1 amb detall, es pot veure que aquesta no és gradual, sinó que en el mig hi ha una zona amb més erosió. Aquest tipus de detall no es capta amb el programa.

Això podria ser degut a que aquesta erosió no tingui a veure amb temes hidrològics únicament i que altres factors, més de tipus geotècnic, afectessin a la zona esmentada.

Zona exterior als canals

Anàlogament al cas anterior i d'acord amb els resultats obtinguts, l'àrea que queda fora dels canals no pateix erosió.

5.3 T = 2 ANYS

Finalment, per intentar aproximar-nos més als resultats reals (valors d'erosió al canal principal menor i menys erosió als canals secundaris 2 i 3), s'ha fet una última simulació per a una pluja de disseny de 2 anys de període de retorn. Aquesta és la més lleu, amb un pic de pluja de 2,3 mm. Els resultats d'erosió es mostren a la Figura 36 i es comparen amb el mapa d'erosió real.



Figura 36. Erosió (m) per a l'esdeveniment de 2 anys de període de retorn.

Canal principal

Per a aquest cas s'observa també erosió al llarg de tot el canal principal, que augmenta a mesura que anem en direcció a la sortida de la conca.

S'observen les mateixes dues zones que per als altres dos casos, en que el valor de l'erosió és més alt, que coincideixen amb les zones de més calat: tram entre els canals secundaris 1 i 3, on l'erosió que hi tenim arriba als 0,4 m; tram des del canal secundari 1 a la sortida de la conca, on els valors van des dels 0,4 m i arriben fins als 0,78 m entre la primera i segona corba del canal (mirant aigües amunt).

Per tant, Iber capta bé les tendències erosives del canal principal per a aquesta pluja de disseny encara que, i a diferència dels altres dos casos estudiats, els valors ara són menors als reals que, recordem, eren d'1 m al tram final i 0,8 m al tram central.

Canals secundaris

El canals secundaris que pateixen més erosió són l'1 i el 4 on tenim uns pocs centímetres (fins a 10 cm) de pèrdua de material. En canvi, els canals 2 i 3 pràcticament no en pateixen pràcticament (només una mica a la intersecció amb el canal principal, també de pocs centímetres).

Per tant, la simulació de 2 anys de període de retorn estaria captant de millor manera el comportament dels canals secundaris, ja que només dona erosió pel primer i quart, encara que els valors resultants són molt menors (els reals eren de 0,3 m al primer i 0,5 m al quart).

Zona exterior als canals

Tota la zona de fora dels canals dissenyats no pateix erosió, a diferència del que s'observa a la realitat.

6. CONCLUSIONS

L'objectiu del present document ha sigut estudiar la possibilitat de fer servir una eina de simulació hidràulica i hidrològica, en aquest cas Iber, com a complement de restauracions geomorfològiques creades a partir de GeoFluv – Natural Regrade. S'ha escollit la restauració feta l'any 2012 a la mina El Machorro, situada al Parc Natural de l'Alto Tajo.

Per dur a terme això, el que s'ha fet en primer lloc és determinar les erosions reals partint d'un conjunt de models d'elevació del terreny per als anys 2012, 2015, 2017 i 2018 que s'han restat per aconseguir un mapa d'erosions (m) de la zona restaurada. En aquest mapa s'observa una major erosió als canals dissenyats, sobretot al tram central i final del canal principal. També, els canals secundaris 1 i 4 (sent l'1 el que es troba més aigües avall i el 4 el de més aigües amunt) pateixen una erosió, encara que menor. A més, tota la zona alta de la conca es veu erosionada també, amb valors que arriben al mig metre.

Després, s'han creat tres pluges de disseny diferents de 24 h de durada i de 2, 5 i 100 anys de període de retorn, per a fer un estudi de tendències erosives de la restauració. S'ha decidit usar un únic esdeveniment per a comparar un període de 6 anys, donat que el temps de càlcul hagués sigut molt elevat i que no es tenien dades pluviomètriques de la zona de la restauració.

A partir d'això, s'han fet les simulacions per poder treure els mapes de tensió de fons, per a cada pas de temps i per a les tres simulacions, i s'ha calculat la taxa d'erosió (m/s) seguint la formulació d'Ariathurai i Arulanandan; aquesta fa dependre l'erosió de la diferència entre la tensió de fons i una crítica (funció del diàmetre de partícula) i d'un valor representatiu de la taxa d'erosió. Per tant, un cop es tenien els mapes de taxa d'erosió, s'han multiplicat per l'interval de temps usat i s'han sumat per poder obtenir un mapa d'erosions totals per a cada pluja diferent.

La primera simulació feta ha sigut la de període de retorn de 100 anys. Amb aquesta s'ha pogut veure una bona aproximació de les tendències erosives, encara que els valors d'erosió estaven sobreestimats. Per tal causa, s'ha optat per seguir l'estudi amb períodes de retorn decreixents (5 i 2 anys) fins que els valors obtinguts s'han ajustat de manera més precisa als observats i calculats fent diferències del models d'elevació.

La tendència erosiva per als tres casos és molt similar, on varia la quantitat de material erosionat segons la intensitat de l'esdeveniment usat: quant més forta sigui la pluja, més calat genera i més tensió de fons que farà que més material es mobilitzi. Iber aconsegueix simular bé les zones amb més o menys material erosionat dels canals, sobretot del principal.

Els canals secundaris es simulen millor amb la pluja de 2 anys de període de retorn. En canvi, les pluges de 5 i 100 anys són massa fortes per a representar l'estat real, generant erosió en aquests canals quan realment no hi va haver.

Per últim, l'erosió observada a la part alta de la conca no s'observa a cap de les tres simulacions fetes, ja que allà hi havia un calat pràcticament nul. Per tant, el fet de no tenir erosió pot ser degut a diferents factors com:

- Mal calibratge del diàmetre de la partícula. En aquest treball s'agafa un diàmetre de partícula únic per a tota la conca i pot ser que hi hagi material més fi que no s'ha tingut en compte.
- Com ja s'ha comentat, per al càlcul de l'erosió s'ha necessitat calcular abans la tensió crítica. Això s'ha dut a terme amb el criteri de Shields, que sol ser usat per a cursos fluvials i no per vessants.
- Mala estimació del paràmetre M de la fórmula d'Ariathurai i Arulanandan que hauria de ser un paràmetre obtingut a partir d'una calibració amb dades de camp.
- Només s'està tenint en compte la posada en moviment de les partícules degut a l'escorrentiu, sense tenir en compte la posada en suspensió de partícules per impacte de la pluja.
- Una mala compactació del material a l'hora de construir la restauració, que pot haver deixat materials solts que marxessin amb les primeres pluges fortes.
- Fenòmens de retracció – esquerdamet del sòl quan no està saturat, que pot donar lloc a inestabilitat dels talussos construïts.

Doncs, es pot concloure que Iber pot ser una eina molt útil per complementar el mètode Geofluv i dissenyar restauracions més estables, ja que els resultats obtinguts són molt satisfactoris: la tendència erosiva es capta bé, sobretot per a pluges menys intenses. A més, s'ha de tenir en compte que només s'ha usat el mòdul hidrològic del software i s'han fet simplificacions com usar un únic diàmetre de partícula o un model d'infiltració senzill. Amb els mòduls de transport de sediment o erosió de vessants, es podrien fer càlculs més aproximats.

Amb un esdeveniment de 24 hores d'entre 2 i 5 anys de període de retorn s'han aconseguit valors prou correctes, tenint en compte que en aquest tipus de simulació amb transport de sediment, basat en equacions empíriques, si els resultats s'aproximen a les observacions en un ordre de magnitud, es poden considerar resultats bons.

7. REFERÈNCIES

- ACA. (2003). Recomanacions tècniques per als estudis d'inundabilitat d'àmbit local. *Agència Catalana Del Agua. Guia Tècnica.*, 106.
- Archivo:Situation map of Alto Tajo Natural Park.png - Wikipedia, la enciclopedia libre. (n.d.). Retrieved May 26, 2022, from https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Situation_map_of_Alto_Tajo_Natural_Park.png
- Aznar Bellver, J., & Estruch Guitart, V. (2011). Valoración de activos ambientales mediante métodos multicriterio. Aplicación a la valoración del Parque Natural del Alto Tajo. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 7(13), 107. <https://doi.org/10.7201/earn.2007.13.06>
- Benaïchouche, A., Stab, O., Tessier, B., & Cojan, I. (2016). Evaluation of a landscape evolution model to simulate stream piracy: Insights from multivariable numerical tests using the example of the Meuse basin, France. *Geomorphology*, 253, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.001>
- Bugosh, N., & Epp, E. (2019). Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphic-reclamation watersheds at La Plata Mine. *Catena*, 174(November 2017), 383–398. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.048>
- Campos Moreno, S. A. (2016). *EVALUACIÓN DE LA REVEGETACIÓN Y COLONIZACIÓN NATURAL EN LA MINA DE CAOLÍN "EL MACHORRO" (ALTO TAJO) CON RESTAURACIÓN GEOMORFOLÓGICA GEOFLUV.*
- Caracterización Reserva.* (n.d.).
- Carcavilla, L. (2006). *La divulgación de la geología en espacios protegidos: las georutas del Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara).*
- Carcavilla, L., Ruiz, R., & Rodríguez, E. (2008). *Guía geológica del Parque Natural del Alto Tajo.*
- Cea, L., & Bladé, E. (1969). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Journal of the American Water Resources Association*, 5(3), 2–2. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x>
- Complutense Madrid, U. (n.d.). *RESTAURACIÓN GEOMORFOLÓGICA.* Retrieved June 28, 2022, from <https://www.ucm.es/otri/complutransfer-restauracion-geomorfologica>
- Coulthard, T. J. (2001). Landscape evolution models: a software review. *Hydrological Processes*, 15(1), 165–173. <https://doi.org/10.1002/hyp.426>
- Coulthard, Tom J., Hancock, G. R., & Lowry, J. B. C. (2012). Modelling soil erosion with a downscaled landscape evolution model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(10), 1046–1055. <https://doi.org/10.1002/esp.3226>
- Coulthard, Tom J., Neal, J. C., Bates, P. D., Ramirez, J., de Almeida, G. A. M., & Hancock, G. R. (2013). Integrating the LISFLOOD-FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: Implications for modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(15), 1897–1906. <https://doi.org/10.1002/esp.3478>
- Diputación de Guadalajara. (n.d.). *Alto Tajo.* Retrieved May 22, 2022, from <https://www.dguadalajara.es/web/guest/alto-tajo>

- Duque, J. F. M., & Bugosh, N. (2013). *Espacio Afectado Por Actividades Mineras : Del Uso De Criterios Geomorfológicos Al Método Geofluv*. 1–11.
- F. Sawatsky, L., & R. E. Beckstead, G. (1996). *Geomorphic approach for design of sustainable drainage systems for mineland reclamation* (pp. 127–129).
- Fauna Alto Tajo*. (n.d.). Retrieved May 26, 2022, from <http://sauce.pntic.mec.es/~jfranc2/fauna.htm>
- Fauna del Parque Natural del Alto Tajo*. (n.d.).
- García, M. H. (2006). *Sedimentation Engineering: Theory, Measurements, Modeling, and Practice*.
- Gómez Orea, D., & Rubio Blanco, D. (2000). Plan de ordenación de los recursos naturales y desarrollo sostenido del Alto Tajo. *Observatorio Medioambiental*, 3, 159–194. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=197438&orden=1&info=link%5Cnhttps://dialnet.unirioja.es/servlet/extart?codigo=197438>
- Hancock, G. R. (2004). The use of landscape evolution models in mining rehabilitation design. *Environmental Geology*, 46(5), 561–573. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1030-3>
- Hancock, G. R., Duque, J. M., & Willgoose, G. R. (2019). Geomorphic design and modelling at catchment scale for best mine rehabilitation – The Drayton mine example (New South Wales, Australia). *Environmental Modelling and Software*, 114(December 2018), 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.12.003>
- Hancock, G. R., Lowry, J. B. C., Coulthard, T. J., Evans, K. G., & Moliere, D. R. (2010). A catchment scale evaluation of the SIBERIA and CAESAR landscape evolution models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(8), 863–875. <https://doi.org/10.1002/esp.1863>
- Ibález Martínez, R. (n.d.). Parque Natural del Alto Tajo. *Leader II. Molina de Aragón Alto Tajo*.
- ITGE. (1989). Manual de Restauracion de Terrenos y Evaluacion de Impactos Ambientales en Minería. In *Instituto Tecnológico GeoMinero de España*.
- José, J., & Monsalve, M. (2009). Marco Histórico Y Estado Del Arte De Los Modelos De Evolución Del Paisaje Y De Erosión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8150(15), 47–57.
- Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. (n.d.). *Alto Tajo. Información general*.
- Martín-Duque, J. F. (2012). *El método Geofluv y el software Natural Regrade*. 11.
- Martín-Moreno, C., Martín Duque, J. F., Nicolau Ibarra, J. M., Muñoz-Martín, A., & Zapico, I. (2018). Waste dump erosional landform stability – a critical issue for mountain mining. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(7), 1431–1450. <https://doi.org/10.1002/esp.4327>
- Martín Duque, J., Martín-Moreno, C., Nicolau, J. M., Sanz, M. A., & Lucía, A. (n.d.). *Impacto hidrogeomorfológico de las minas y escombreras de Peñalén (Guadalajara) sobre el Parque Natural del Alto Tajo*. 23(2009), 27–44.
- Martín Moreno, C. (2013). *Cuantificación de la producción de sedimento en la zona minera del Parque Natural del Alto Tajo*.
- Odoni, N. A. (2007). *Exploring equifinality in a landscape evolution model*. [http://eprints.soton.ac.uk/153687/1/Whole_thesis_v1_\(2\).pdf](http://eprints.soton.ac.uk/153687/1/Whole_thesis_v1_(2).pdf)

- Parque Natural del Alto Tajo en España | spain.info en español.* (n.d.). Retrieved May 22, 2022, from <https://www.spain.info/es/naturaleza/parque-natural-alto-tajo/>
- Pérez Fernández, R. (2005). Rholocera del Parque Natural del Alto Tajo, Guadalajara, España (Insecta: Lepidoptera). *SHILAP Revista de Lepidopterología*, 33(129), 49–82.
- Restauración de minas - ONEP.* (n.d.). Retrieved June 11, 2022, from <https://oninclusiventrepreneur.com/es/nuevos-yacimientos/empleo-verde-servicios-ambientales/restauracion-paisajistica-y-areas-degradadas/restauracion-de-minas/>
- Sanz-Ramos, M., Cea, L., Bladé, E., López-Gómez, D., Sañudo, E., Corestein, G., García-Alén, G., & Aragón-Hernández, J. L. (2022). Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones. *Iber v3. Reference Manual and User's Interface of the New Implementations*. <https://doi.org/10.23967/IBER.2022.01>
- Van De Wiel, M. J., Coulthard, T. J., Macklin, M. G., & Lewin, J. (2007). Embedding reach-scale fluvial dynamics within the CAESAR cellular automaton landscape evolution model. *Geomorphology*, 90(3–4), 283–301. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.024>
- Vegetación Alto Tajo.* (n.d.). Retrieved May 26, 2022, from <http://sauce.pntic.mec.es/~jfranc2/MEDIO NATURAL.htm>
- Zapico, I., Martín Duque, J. F., Bugosh, N., Laronne, J. B., Ortega, A., Molina, A., Martín-Moreno, C., Nicolau, J. M., & Sánchez Castillo, L. (2018). Geomorphic reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites: The Alto Tajo Natural Park, Spain. *Ecological Engineering*, 111(November 2017), 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.11.011>
- Zapico, I., Molina, A., Laronne, J. B., Sánchez Castillo, L., & Martín Duque, J. F. (2020). Stabilization by geomorphic reclamation of a rotational landslide in an abandoned mine next to the Alto Tajo Natural Park. *Engineering Geology*, 264(March 2019). <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105321>

