


LP 04 - Derivatele complexe. Modelarea hidrologică a rețelei de drenaj

prep. drd. Mihai NICULIȚĂ

19 noiembrie 2012

Departamentul de Geografie
Facultatea de Geografie și Geologie
Universitatea Alexandru Ioan Cuza, Iași, Romania

Acest material se află sub licență Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported (CC BY-NC-SA 3.0), reprezentând responsabilitatea unică a autorului și nu reprezintă neapărat poziția oficială a UAIC. 

Lucrarea practică își propune descrierea și calculul variabilelor geomorfometrice de iluminare a suprafeței terestre. Finalitatea lucrării practice este obținerea unei hărți reprezentând variabilelor geomorfometrice de iluminare a suprafeței terestre reprezentate de modelul SRTM, utilizat de fiecare student în parte și statistica descriptivă a acestora.

1 Umbrirea

Umbrirea se poate deriva direct din expoziție (fig. 4.2.7) și reprezintă un indice adimensional, care exprimă în procente, de la 0 la 100, gradul de umbrire al suprafeței terenului funcție de poziția Soarelui pe cer, poziție indicată de utilizator. Acest model de calcul al umbririi presupune un model Lambertian de reflectanță (Horn [1970], Cooper [2003]), adică suprafața reflectă toată lumina ajunsă la aceasta egal către toate direcțiile, umbrirea reprezentând intensitatea luminii reflectate de către suprafața terestră. Soarele, ca punct de plecare al razelor este considerat la o distanță infinită iar razele solare care sosesc spre suprafața terestră sunt paralele. Pentru realismul vizualizării umbririi se poate introduce în locul valorii 0 (umbrire totală) o valoare medie a radiației difuze Corripio [2003].

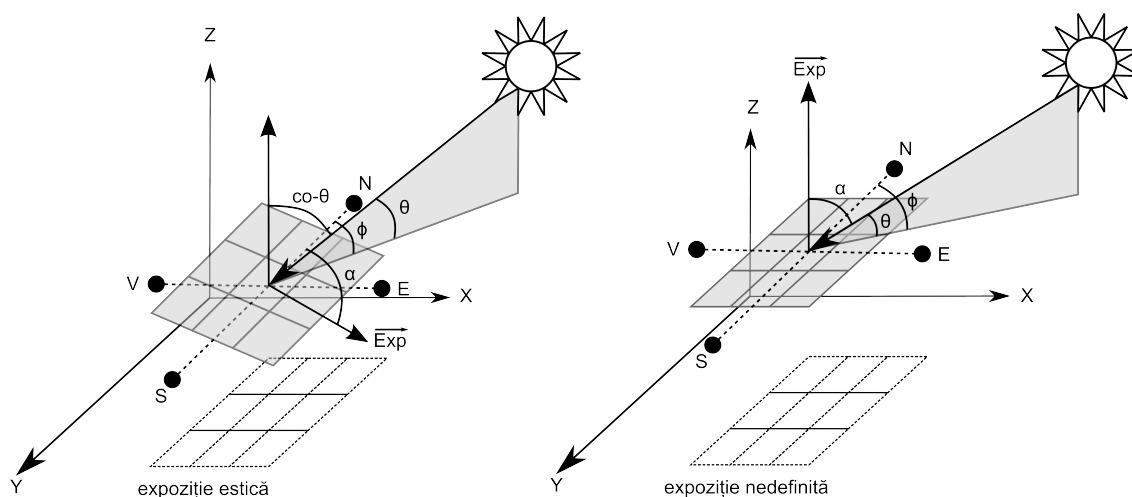


Figura 1: Modelul geometric de calcul al umbririi

Formulele de calcul ale umbririi sunt variate, dar includ utilizarea gradientilor din fereastră glisantă menționați la derivarea pantei (ecuațiile 1 și 2 din):

- Zhou [1992]:

$$U = \frac{100}{c} \times \left(\sin \theta - \frac{\delta_z}{\delta_x} \times \sin \phi \times \cos \theta - \frac{\delta_z}{\delta_y} \cos \phi \times \cos \theta \right) \quad (1)$$

unde

$$c = \sqrt{1 + \left(\frac{\delta_z}{\delta_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta_z}{\delta_y}\right)^2} \quad (2)$$

$$\phi = \text{azimutul Soarelui față de direcția Nord} \quad (3)$$

$$\theta = \text{înălțimea Soarelui pe cer} \quad (4)$$

- Shary et al. [2002]:

$$U = 50 \times \left\{ 1 + \text{sign} \left[\cos a - \sin a \times \left(\frac{\delta_z}{\delta_x} \times \sin \phi + \frac{\delta_z}{\delta_y} \times \cos \phi \right) \right] \right\} \times \frac{\left[\cos a - \sin a \times \left(\frac{\delta_z}{\delta_x} \times \sin \phi + \frac{\delta_z}{\delta_y} \times \cos \phi \right) \right]}{\left[1 + \left(\frac{\delta_z}{\delta_x} \right)^2 + \left(\frac{\delta_z}{\delta_y} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

unde

$$90 - a = \text{înălțimea Soarelui pe cer} \quad (6)$$

Cea mai tipică utilizare a umbririi este vizualizarea acesteia cu o paletă de culori în tonuri de gri, eventual cu introducerea unei transparențe și suprapunerea peste o hartă hipsometrică sau peste modelul numeric al altitudinii suprafeței terenului vizualizat cu o paletă de culori hipsometrice. Acest tip de vizualizare ține locul unei *hărți morfografice*, în accepțiunea clasică, pe baza căreia geomorfologul poate recunoaște forma suprafeței terestre în zona respectivă. Vizualizarea umbririi este importantă și în evaluarea calității modelului numeric după ce acesta a fost interpolat, deoarece vizualizarea altitudinii reprezentată de o paletă de culori poate ascunde eventualele erori de interpolare. Cu ajutorul vizualizării umbririi ne putem face o imagine calitativă asupra formei suprafeței terestre. În cartografie există o multitudine de metode de creare a umbririi, în această branșă derivarea umbririi folosind modelele numerice ale suprafeței terestre fiind denumită *metoda analitică* Jenny [2001]. Umbrirea se vizualizează utilizând palete de culori în tonuri de gri, care pentru realism.

Umbrirea poate fi utilizată la estimarea cantitativă a formei suprafeței terestre, utilizând imagini satelitare și știindu-se parametrii iluminării Horn [1970], Wilson and Hancock [1999], Liu [2003], Cooper [2003]. Această metodă a fost folosită pentru estimarea altitudinilor suprafeței unor planete ca Marte [Dorrer and Zhou, 1998] sau a satelitului Luna Lohse and Heipke [2004].

Umbrirea poate fi calculată pentru fiecare interval orar al zilei, ca medie a oricărei zile, și ca medie anuală, putând fi utilizată în corectarea cantității de radiație ajunsă la nivelul suprafeței terestre (insolația), în modele fizice complexe care pot include și corecția temperaturii, unidității și evapotranspirației. Astfel de modele fizice complexe au fost implementate de Wilson and Gallant [2000b] ca SRAD în TAPES-G și de Suri and Hofierka [2004], Šúri et al. [2007] ca funcțiile *r.sun* și *r.shading* în GRASS GIS. Umbrirea poate fi relaționată cu radiația directă.

Pe lângă umbrirea datorată expoziției și pantei suprafeței terestre, și altitudinile vecine pot crea *umbrire indirectă*. Aceasta se calculează pe baza *unghiului zenital al orizontului vizibil*. Dacă pixelul în cauză se află în umbra unui pixel vecin, acesta trebuie considerat umbrat (umbrire de valoare 0) Böhner and Antonic [2009].

2 Calculul în SAGA

Se deschide SAGA GIS. Fișierul *SRTM3_30m_stereo_”rând”_”coloană”.sgrd* se încarcă în aplicația SAGA GIS (FILE/GRID/LOAD).

În fereastra WORKSPACE/MODULES este disponibilă în cadrul librăriei ***Terrain Analysis - Lighting, Visibility***, funcția *Analytical Hillshading*. La **Data Objects**, se alege la **Grids**, ca **Grid System** extinderea disponibilă (30; 1100x 1100y; coordx coordy), ca >>Elevation rasterul SRTM, iar la <<*Analytical Hillshading* să fie ales *create*. La **Options, Shading Method** poate fi setat: *Standard*, *Standard (max. 90 degrees)*, *Combined Shading* și *Ray Tracing*. Metoda *Standard* presupune luarea în calcul a unei singure poziții a Soarelui, definită de *Azimuth* [poziția Soarelui pe bolta cerească, în grade față de direcția nord], *Declinație* [înălțimea Soarelui pe bolta cerească, în grade față de planul orizontalei] și *Exagerare*. Metoda *Combined Shading* calculează umbrirea funcție de mai multe poziții, după care mediază valorile obținute. Metoda *Ray Tracing* presupune aplicarea unui model complex, care include și reflecțiile razelor de pe suprafața terestră. După setarea parametrilor doriți se rulează funcția prin apăsarea *Okay*.

Semnalul sonor, bara albastră din partea dreaptă jos și mesajul din fereastra MESSAGES: *Module execution succeeded* arată că funcția a fost finalizată cu succes. Ca urmare a rulării funcției, în WORKSPACE/DATA/TREE, sub *Grids* apare 1 raster numit *02. Analytical Hillshading*, care va fi salvat prin click dreapta **Save As...**, în *E:/Geomorfologie/nume_prenume*.

În fereastra WORKSPACE/MODULES este disponibilă în cadrul librăriei ***Terrain Analysis - Lighting, Visibility***, funcția *Sky View Factor*. La **Data Objects**, se alege la **Grids**, ca **Grid System** extinderea disponibilă (30; 1100x 1100y; coordx coordy), ca >>Elevation rasterul SRTM, iar la <<*Sky View factor*, să fie ales *create*. La **Options, Maximum Search Radius** se alege *1000*, la **Method** se alege *multi scale*, iar la **Multi Scale Factor** se alege *3*. Metoda *multi scale* utilizează ferestre glisante de mărimi din ce în ce mai mari, în care estimează unghiul zenital al orizontului vizibil, în cazul de față utilizând 3 astfel de ferestre. După setarea parametrilor doriți se rulează funcția prin apăsarea *Okay*.

Semnalul sonor, bara albastră din partea dreaptă jos și mesajul din fereastra MESSAGES: *Module execution succeeded* arată că funcția a fost finalizată cu succes. Ca urmare a rulării funcției, în WORKSPACE/DATA/TREE, sub *Grids* apare 1 raster numit *03. Sky View Factor*, care va fi salvat prin click dreapta **Save As...**, în *E:/Geomorfologie/nume_prenume*.

3 Aria de drenaj

Aria de drenaj reprezintă suprafața amonte care la precipitații generează scurgere spre o anumită secțiune [Wilson and Gallant, 2000a]. Pe modelul vectorial al curbilor de nivel secțiunea este un segment al curbilor de nivel, iar pe modelul raster este latura pixelului. Această variabilă a fost numită: acumularea scurgerii, mai ales pentru un stadiu intermediar de calcul, reprezentând numărul de pixeli din amonte a căror scurgere se acumulează către pixelul respectiv, sau aria din amonte/aria de drenaj (de bazin de drenaj), care reprezintă suprafața amonte care generează scurgere către pixelul respectiv. Când se utilizează atributul totală, aria de drenaj se exprimă ca **arie totală de drenaj (ATD)**, iar când se utilizează atributul specifică, aria totală se împarte la aria pixelului, sau la lungimea curbei de nivel care primește scurgerea de pe acea arie, obținându-se **aria specifică de drenaj (ASD)**.

Pentru a se putea modela aria de drenaj, trebuie derivată mai întâi **direcția de drenaj (DD)**. Aceasta este foarte asemănătoare cu aspectul, fiind obținută cu ajutorul formulei Gallant and Wilson [1996]:

$$DD = 2^{j-1}, \text{ unde } j = MG \text{ (ec. 4.2.49).} \quad (7)$$

Calculul ariei de drenaj, după identificarea direcției/direcțiilor de scurgere și a unei matrici de conectivitate (care conține codarea pixelului/pixelilor care generează scurgere spre pixelul central) se realizează prin atribuirea în pași iterativi pixelului central, ariei/proporției din arie pixelului/pixelilor care au direcție de scurgere către acesta (Fig. 2).

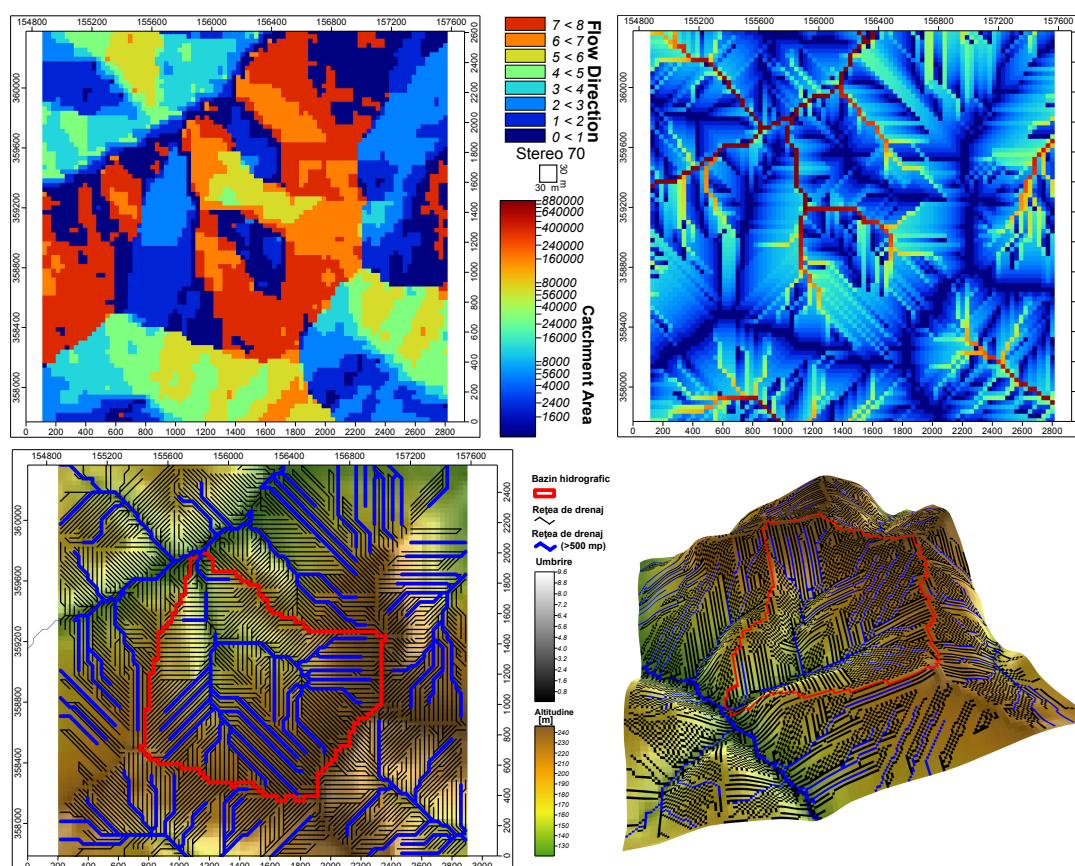


Figura 2: Calculul ariei de drenaj

Datorită prezenței unor depresiuni reale în suprafața studiată (doline, depresiuni antropice), fie datorită prezenței unor erori în modelul numeric sub forma unor depresiuni, datorate în special interpolărilor, sau prezenței vegetației sau elementelor antropice în modelele cu sursă satelitară, scurgerea modelată de către algoritmi de calcul a ariei de drenaj poate fi întreruptă. Depresiunile sunt areale în care gradientii pixelului față de vecini săi indică valori negative, din aceste zone rutarea scurgerii nemaifiind posibilă. Rezolvarea acestor depresiuni se poate realiza fie înaintea modelării hidrologice fie în timpul acesteia.

"Corectarea" depresiunilor înaintea aplicării algoritmului de rutare hidrologică presupune identificarea acestora și "umplerea" lor, până la nivelul în care printr-un pixel aflat pe marginea proximă a depresiunii, scurgerea să poată fi continuată. Problema depresiunilor poate fi rezolvată și în timpul aplicării algoritmului.

O altă metodă des întâlnită în crearea modelelor numerice ale altitudinii suprafeței terestre, și care are efecte pozitive în eliminarea erorilor cu efecte în modelarea hidrologică, este impunerea rețelei hidrografice ("hydrologic enforcement"). Impunerea rețelei hidrografice se face prin scăderea unei altitudini predefinite pentru fiecare pixel care se suprapune rețelei hidrografice cartate sau extrase de pe hărți/imagini satelitare. Această metodă este implementată în GRASS GIS ca funcție separată, dar poate fi implementată în orice program SIG care permite conversia vector-raster.

O altă problemă care poate apărea în cazul în care, pentru depresiuni lacustre, are loc "umplerea" acesteia, sau pentru lacuri, când se utilizează măști, pentru a simula onglinda lacustră. În acest caz se formează arii plate, în care modelarea hidrologică realizează linii de drenaj paralele ireale. De aceea Soille [2003, 2004] a propus o metodă de eliminare a barajelor care creează acumularea scurgerii, fapt ce îmbunătățește simularea hidrologică.

Modelarea fizică a scurgerii apei pe modelele numerice ale terenului presupune infiltrație 0 și are două variante de rutare a scurgerii: pe o singură direcție sau pe mai multe direcții.

Algoritmii D8 (Single Flow Eight Directions) [O’Callaghan and Mark, 1984] Apa din precipitațiile căzute pe aria aferentă unui pixel se va deplasa către unul dintre cei opt vecini, care se află în direcția de cea mai mare pantă (ec. 3.2.50-54) O’Callaghan and Mark [1984]. Acest algoritm nu poate modela scurgerea divergentă de pe culmi și generează căi de scurgere liniare, dar modelează scurgerea convergentă în văi și ajută la delimitarea bazinelor hidrografice Gallant and Wilson [2000]. În cazul în care mai mulți vecini întrunesc condiția de pantă, direcția de scurgere va fi atribuită aleator Gruber and Peckham [2009]. Modificări ce țin de implementarea digitală a algoritmului au fost realizate de către Jenson [1985], Jenson and Domingue [1988].

Algoritmul Rho8 (Single Flow Randomized Eight Directions) Fairfield and Leymarie [1991] Acest algoritm introduce un component aleator în calculul direcției de scurgere, între cele două direcții probabile. Se îmbunătățesc problemele algoritmului D8, dar la fiecare rulare succesivă a algoritmului se obțin rezultate diferite, datorită componentului aleator introdus.

Algoritmul de rutare cinematică (RC) Lea [1992] Algoritmul simulează rostogolirea unei mingi pe un plan înclinat, prin impunerea unei suprafețe folosind pixelii de colț, direcția de scurgere fiind orice valoare între 0 și 2π , fără a considera dispersia.

Algoritmul MFD (Multiple Flow Direction) Algoritmi de direcții de scurgere multiple au fost implementați de diverși autori [Freeman, 1991] pentru a simula scurgerea divergentă de pe culmi, punctul slab al algoritmului D8, care de altfel este foarte rapid ca timp de calcul.

Formula de calcul a fracției de scurgere pentru fiecare vecin i este [Gruber and Peckham, 2009]:

$$i = \frac{\tan(\beta_i)^v \times L_i}{\sum_{j=1}^8 [\tan(\beta_j)^v \times L_j]} \quad (8)$$

unde parametrul v controlează gradul de dispersie. Pentru acest parametru Freeman [1991] indică o valoare optimă (testată pe suprafețe matematice) de 1,1, valori mari concentrând drenajul, iar valori mici (dar ≥ 0) dispersând scurgerea. Singura problemă raportată de diverși autori este faptul că dispersia este prea mare în cazul aplicării acestui algoritm.

Algoritmul DEMON (Digital Elevation Model) Costa-Cabral and Burges [1994] Costa-Cabral and Burges [1994] extind ideile lui Lea [1992], și impun o suprafață altitudinilor din colțurile ferestrei glisante, utilizând altitudinile pixelilor de colț, considerând direcția de drenaj rezultată ca aplicându-se întregii ferestre glisante. În locul considerării unei sfere care se deplasează pe suprafața rezultată, acest algoritm consideră drenajul unui val de apă care se scurge pe suprafața impusă ferestrei glisante, pornind dintr-un punct, conform direcției gradientului. Acest val se poate contracta sau dilata funcție de configurația suprafeței, iar valorile de arie de drenaj se determină ca pondere a scurgerii pentru fiecare pixel întâlnit. După simularea realizată pentru toți pixelii, se calculează suma proporțiilor.

Algoritmul D_∞ (Dinf)[Tarboton, 1997] Acest algoritm calculează direcția vectorului pantă (variantea inițială calculează valori cuprinse în intervalul $0 - 2\pi$, dar gradele sunt mai indicate Gruber and Peckham [2009]), pe baza unor triunghiuri formate de pixelul central cu pixelii vecini, și atribuie direcția scurgerii către pixelul din direcția ei. Când direcția este între doi pixeli vecini aflați de o parte și de cealaltă a vectorului pantă, se aplică o formulă de atribuire către ambii vectori ai scurgerii Tarboton [1997], Gruber and Peckham [2009]:

$$d_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (9)$$


$$d_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (10)$$

Acest lucru duce la introducerea unei dispersii, dar limitată doar la situațiile când direcțiile nu sunt aferente direcțiilor cardinale, situație ce reduce mult din artificialitatea direcțiilor de drenaj.

Pentru un pixel oarecare se poate defini pe baza matricii de acumulare a scurgerii rezultate din direcția de drenaj, se poate defini și **aria de drenaj în amonte** (AD_{am}), respectiv **aria de dispersie în aval** (AD_{av}) Gruber et al. [2009].

Calculul ariei de drenaj se poate realiza și pe modele numerice ale suprafeței terestre de tip vector Silfer et al. [1987].

4 Calculul în SAGA

Se deschide SAGA GIS. Fișierul *SRTM3_30m_stereo_”rând”_”coloană”.sgrd* se încarcă în aplicația SAGA GIS (FILE/GRID/LOAD) .

În fereastra WORKSPACE/MODULES este disponibilă în cadrul librăriei ***Terrain Analysis - Preprocessing***, funcția *Fill Sinks* (Wang & Liu). La **Data Objects**, se alege la **Grids**, ca **Grid System** extinderea disponibilă (30; 1100x 1100y; coordx coordy), ca >>Elevation rasterul SRTM, iar la <<Filled DEM să fie ales *create*, la <<Flow Directions să fie ales *create*, la <<Watershed Basin să fie ales *create*. La **Options**, **Minimum Slope [Degree]** să fie 0.1, apoi se rulează funcția prin apăsarea *Okay*.

Semnalul sonor, bara albastră din partea dreaptă jos și mesajul din fereastra MESSAGES: *Module execution succeeded* arată că funcția a fost finalizată cu succes. Ca urmare a rulării funcției, în WORKSPACE/DATA/TREE, sub *Grids* apar 3 rastere numite 02. *SRTM3_30m_stereo_”rând”_”coloană”[no sinks]*, 03. *Flow Directions*, și 04. *Watershed Basins*, care vor fi salvate prin click dreapta **Save As...**, în *E:/Geomorfologie/nume_prenume*.

În fereastra WORKSPACE/MODULES este disponibilă în cadrul librăriei ***Terrain Analysis - Channels***, funcția *D8 Flow Analysis*. La **Data Objects**, se alege la **Grids**, ca **Grid System** extinderea disponibilă (30; 1100x 1100y; coordx coordy), ca >>Elevation rasterul SRTM preprocesat (02. *SRTM3_30m_stereo_”rând”_”coloană”[no sinks]*), la <<Flow Direction să fie ales *create*, la <<Flow Connectivity să fie ales *create*, iar la **Grids**, ca **Shapes**, Flow Network să fie ales *create*. La **Options**, **Minimum Connectivity** să fie 01, apoi se rulează funcția prin apăsarea *Okay*.

Semnalul sonor, bara albastră din partea dreaptă jos și mesajul din fereastra MESSAGES: *Module execution succeeded* arată că funcția a fost finalizată cu succes. Ca urmare a rulării funcției, în WORKSPACE/DATA/TREE, sub *Grids* apar 2 rastere numite 05. *Flow Direction*, și 06. *Flow Connectivity*, plus sub *Shapes/Line* apare un vector numit, 01. *D8 Flow Network*, care vor fi salvate prin click dreapta **Save As...**, în *E:/Geomorfologie/nume_prenume*.

În fereastra WORKSPACE/MODULES este disponibilă în cadrul librăriei ***Terrain Analysis - Hydrology***, funcția *Catchment Area (Parallel)*. La **Data Objects**, se alege la **Grids**, ca **Grid System** extinderea disponibilă (30; 1100x 1100y; coordx coordy), ca >>Elevation rasterul SRTM preprocesat (02. *SRTM3_30m_stereo_”rând”_”coloană”[no sinks]*), iar doar la <<Catchment Area să fie ales *create*. La **Options**, **Step** să fie 1, **Method** să fie *Deterministic 8*, **Linear Flow** să nu fie bifat, **Linear Flow Threshold** să fie 500, **Convergence** să fie 1, apoi se rulează funcția prin apăsarea *Okay*.

Semnalul sonor, bara albastră din partea dreaptă jos și mesajul din fereastra MESSAGES: *Module execution succeeded* arată că funcția a fost finalizată cu succes. Ca urmare a rulării funcției, în WORKSPACE/DATA/TREE, sub *Grids* apare un raster numite 07. *Catchment Area*, care va fi salvat prin click dreapta **Save As...**, în *E:/Geomorfologie/nume_prenume*.

În fereastra WORKSPACE/MODULES este disponibilă în cadrul librăriei ***Terrain Analysis - Channels***, funcția *Channel Network*. La **Data Objects**, se alege la **Grids**, ca **Grid System** extinderea disponibilă (30; 1100x 1100y; coordx coordy), ca >>Elevation rasterul SRTM preprocesat (02. *SRTM3_30m_stereo_”rând”_”coloană”[no sinks]*), iar la <<Flow Direction să fie ales 06. *Flow Direction*, la <<Channel Network să fie ales *create*, la <<Channel Direction să fie ales *create*, la <<Initiatoin Grid să fie ales 07. *Catchment Area*, la <<Initiation Type să fie ales *Greater than*, la <<Initiation Threshold să fie ales 4500, iar la **Shapes** <<Channel Network să

fie ales *create*. La **Options**, **Min. Segment Length** să fie 100, apoi se rulează funcția prin apăsarea *Okay*.

Semnalul sonor, bara albastră din partea dreaptă jos și mesajul din fereastra **MESSAGES: Module execution succeeded** arată că funcția a fost finalizată cu succes. Ca urmare a rulării funcției, în **WORKSPACE/DATA/TREE**, sub *Grids* apar 2 rastere numite 08. *Channel Network* și 09. *Channel Direction*, plus sub *Shapes/Line* apare un vector numit, 01. *Channel Network*, care vor fi salvate prin click dreapta **Save As...**, în *E:/Geomorfologie/nume_prenume*.

5 Întocmirea descrierii

Se deschide aplicația Open Office Write, se crează un tabel cu 3 coloane și 15 rânduri. În acest tabel se vor introduce datele din fișierul *statistica_descriptiva.txt*.

Bibliografie

- J. Böhner and O. Antonic. Land-Surface Parameters Specific to Topo-Climatology. In *Geomorphometry: concepts, software, applications*, volume 33, pages 195–226. 2009. doi: 10.1016/S0166-2481(08)00008-1.
- G Cooper. Feature detection using sun shading. *Computers & Geosciences*, 29(8):941–948, October 2003. ISSN 00983004. doi: 10.1016/S0098-3004(03)00091-8. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300403000918>.
- Javier G Corripio. Vectorial algebra algorithms for calculating terrain parameters from DEMs and solar radiation modelling in mountainous terrain. *International Journal of Geographical Information Science*, (Skidmore 1989):1–23, 2003. doi: 10.1080/13658810210157796.
- Mariza C Costa-Cabral and J Burges. Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation and dispersal areas Specific contributing area. *Water Resources Research*, 30(6):1681–1692, 1994.
- Egon Dorrer and Xiuguang Zhou. Towards optimal relief representation from Mars imagery by combinatiap-e-from-shadingon of DEM and sh. In *'IAPRS', Vol. 32/4, ISPRS Commission IV Symposium on GIS - Between Visions and Applications, Stuttgart, Germany*, volume 32, pages 156–161, 1998.
- John Fairfield and Pierre Leymarie. Drainage Networks From Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, 27(5):709–717, 1991. ISSN 0043-1397. doi: 10.1029/90WR02658. URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/1991/90WR02658.shtml>.
- T Freeman. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers & Geosciences*, 17(3):413–422, 1991. ISSN 00983004. doi: 10.1016/0098-3004(91)90048-I. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/009830049190048I>.
- John C. Gallant and John P. Wilson. TAPES-G :a grid-based terrain analysis program for the environmental sciences. *Computers & Geosciences*, 22(7):713–722, 1996.
- John C Gallant and John P Wilson. Primary topographic attributes. In *Terrain analysis: principles and applications*, pages 51–85. Wil, 2000.
- S Gruber and S Peckham. Land-surface parameters and objects in hydrology. In *Geomorphometry: concepts, software, applications*, volume 33, pages 171–194. 2009. doi: 10.1016/S0166-2481(08)00007-X.
- S. Gruber, C. Huggel, and Richard J Pike. Modelling mass movements and landslide susceptibility. In *Geomorphometry: concepts, software, applications*, volume 33, pages 527–550. 2009. doi: 10.1016/S0166-2481(08)00023-8.

- Berthold K.P. Horn. Shape from shading: a method for obtaining the shape of a smooth object from one view. Technical report, MIT Artificial Intelligence Laboratory, 1970.
- Bernhard Jenny. An interactive approach to analytical relief shading. *Cartographica*, 38(1-2): 67–75, 2001.
- S K Jenson and J O Domingue. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 54(11):1593–1600, 1988.
- Susan K Jenson. Automated derivation of hydrologic basin characteristics from digital elevation model data. In *Auto-Carto VII Proceedings of the Digital Representations of Spatial Knowledge March 11 - 14, 1985 Washington, D.C.*, number 14, pages 301–310, 1985.
- Nicholas J Lea. An aspect-driven kinematic routing algorithm. In *Overland flow. Hydraulics and erosion mechanics*, pages 374–387. 1992.
- H Liu. Derivation of surface topography and terrain parameters from single satellite image using shape-from-shading technique. *Computers & Geosciences*, 29(10):1229–1239, December 2003. ISSN 00983004. doi: 10.1016/S0098-3004(03)00138-9. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098300403001389>.
- Volker Lohse and Christian Heipke. Multi-image shape-from-shading: derivation of planetary digital terrain models using Clementine images. In *Geo-Imagery Bridging Continents XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey Commission 4*, pages 1–6, 2004. URL http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/Lohse0704_Istanbul.pdf.
- John F. O’Callaghan and David Michael Mark. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3):323–344, December 1984. ISSN 0734189X. doi: 10.1016/S0734-189X(84)80011-0. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734189X84800110>.
- Peter A Shary, Larisa S Sharaya, and Andrew V Mitusov. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, (1):1–19, 2002.
- Andrew T Silfer, Gerald J Kinn, and James M Hassett. A Geographic Information System utilizing the triangulated irregular network as a basis for hydrologic modelling. In *AutoCarto Proceedings 8*, pages 129–136, 1987.
- P Soille. Morphological carving. *Pattern Recognition Letters*, 25(5):543–550, April 2004. ISSN 01678655. doi: 10.1016/j.patrec.2003.12.007. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167865503002599>.
- Pierre Soille. Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 39(12):1–13, 2003. ISSN 0043-1397. doi: 10.1029/2002WR001879. URL <http://www.agu.org/pubs/crossref/2003/2002WR001879.shtml>.
- Marcel Suri and Jaroslav Hofierka. A New GIS-based Solar Radiation Model and Its Application to Photovoltaic Assessments. *Transactions in GIS*, 8(2):175–190, April 2004. ISSN 1361-1682. doi: 10.1111/j.1467-9671.2004.00174.x. URL <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-9671.2004.00174.x>.
- David G Tarboton. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid DEMs. *Water Resources research*, 33(2):309–319, 1997.
- Marcel Šúri, Thomas Huld, Ewan D. Dunlop, and Jaroslav Hofierka. Solar resource modelling for energy applications. In R. J. Pekham and Gyoza Jordan, editors, *Digital Terrain Modelling. Development and applications in a policy support environment*, Lectures Notes in Geoinformation and Cartography, pages 259–273. Springer, 2007. URL <http://www.springerlink.com/index/qtq378jg4724k7r5.pdf>.

- John P. Wilson and John C. Gallant. Digital terrain analysis. In John P. Wilson and John C. Gallant, editors, *Terrain analysis: principles and applications*, pages 1–27. 2000a.
- John P. Wilson and John C. Gallant. Secondary topographic attributes. In John P. Wilson and John C. Gallant, editors, *Terrain analysis: principles and applications*, pages 87–131. 2000b.
- Richard C Wilson and Edwin R Hancock. A Reflectance Model for Radar Shape From Shading 1 Introduction. In *Electronic Proceedings of the Tenth British Machine Vision Conference*, pages 153–162, 1999. URL <http://www.bmva.org/bmvc/1999/papers/16.pdf>.
- Qiming Zhou. Relief shading using digital elevation models. *Computers & Geosciences*, 18(8):1035–1045, September 1992. ISSN 00983004. doi: 10.1016/0098-3004(92)90019-N. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/009830049290019N>.