

## MODELIRANJE VODNE EROZIJE TAL V SLOVENIJI

**dr. Borut Vrščaj**

Kmetijski inštitut Slovenije in Fakulteta za varstvo okolja

borut.vrscaj@kis.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0850-7220>

**Peter Kastelic, Janez Bergant**

Kmetijski inštitut Slovenije

peter.kastelic@kis.si, jani.bergant@kis.si

DOI: [https://doi.org/10.3986/9789610506683\\_04](https://doi.org/10.3986/9789610506683_04)

UDK: 551.311.2:659.2:004:91(497.4)

### IZVLEČEK

#### **Modeliranje vodne erozije tal v Sloveniji**

Erozija, še posebej vodna erozija, je ena bistvenih groženj tlom v svetu, saj ogroža celoten nabor ekosistemskih storitev tal. Boj proti eroziji je zato eden najpomembnejših ukrepov v kmetijstvu, pa tudi v gozdarstvu in drugih rabah prostora. Za uspešno varovanje in omejevanje erozije je treba oceniti erozijska tveganja v prostoru kot tudi intenzivnost erozijskih procesov.

Prispevek predstavlja zasnovano in izvedbo modela RUSLE, modela vodne erozije tal v Sloveniji. Opisani so vhodni nacionalni vsebinski in prostorski podatki, zasnova in izvedba posameznih erozijskih dejavnikov, združena izvedba v okolju GIS in RUSLE-SI ter ocene količine erodiranih tal na različnih rabah tal. Rezultati modeliranja RUSLE (informacijski sloji) so integrirani v GSERmap in tako predstavljajo prispevek Slovenije k izdelavi Globalne karte erozije tal FAO.

### KLJUČNE BESEDE

erozija, model RUSLE, tla, GIS

### ABSTRACT

#### **Modelling soil water erosion in Slovenia**

Erosion, especially water erosion, is one of the major threats to soil in the world. Erosion threatens the full range of soil ecosystem services. Combating erosion is therefore one of the most important measures in agriculture, as well as in forestry and other land uses. To successfully protect and limit erosion, it is necessary to assess erosion risks both spatially and in terms of the intensity of erosion processes.

The paper presents the design and implementation of the RUSLE model of water-soil erosion in Slovenia. The national spatial and content input data, the design and GIS implementation of the individual modules of the erosion factors are described, as well as the RUSLE-SI GIS procedure and estimates of eroded soils under different land uses.

The RUSLE modelling results (information layers) are integrated into the GSERmap and thus represent Slovenia's contribution to the creation of the FAO Global Soil Erosion Map.

### KEY WORDS

erosion, RUSLE model, soil, GIS

## 1 Uvod

Erozija tal je naraven geomorfni proces odnašanja talnih delcev s površine tal. Zaradi delovanja človeka je lahko močno pospešena in pogosto nekajkrat večja kot v naravnih razmerah. Po izvoru jo delimo na vodno in vetrno erozijo tal (FAO 2019). Vodno erozijo povzročajo intenzivni padavinski dogodki, v primeru vetrne erozije pa močnejši vetrovni pojavi (na primer burja). Erozijo lahko obravnavamo na različnih prostorskih ravneh (na primer njiva, porečje, regija, država, celina). Časovno ni konstantna, saj se v največji meri dogaja ob ekstremnih vremenskih dogodkih. Prav zaradi tega je ocenjevanje izdatnosti erozije težka naloga. O nesprejemljivi eroziji govorimo, ko masa erodiranih tal presega maso nastajajočih tal. Slednja je po ocenah Verheijena in sodelavcev (2009; po Zorn 2015) v Evropi med 0,3 in 1,4 t/ha letno.

Za ocenjevanje obsega in izdatnosti erozije so se uveljavile različne strokovne metode in modeli. Takih, ki bi hkrati upoštevali vse možne dejavnike in natančno opredelili izdatnost erozije tal, pa pravzaprav ni. Pri uporabi erozijskih modelov je zato potrebna previdnost pri izbiri vhodnih podatkov in prostorski ločljivosti. Nujna je kritična presoja reprezentativnosti modela v določenem prostoru, na določenih tleh in kasneje preverjanje stanja v naravi. V Evropi je trenutno uveljavljena ocena po RUSLE2015 metodi, ki ocenjuje povprečno stopnjo vodne erozije na 2,46 t/ha letno (Panagos in sodelavci 2015a).

Cilj študije je bil na podlagi modela RUSLE preveriti oceno erozije za Slovenijo (Panagos in sodelavci 2015a), ob uporabi natančnejših podatkov. Rezultati kažejo na izdatnost erozijskih procesov v Sloveniji in na nujnost usmerjanja kmetijsko okoljskih ukrepov v novem programskem obdobju Programa razvoja podeželja ter so hkrati prispevek k razpravi o varovanju tal na ravni Slovenije.

## 2 Osnovno o modelu ocene vodne erozije RUSLE in njegovih dejavnikih

RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*, popravljena univerzalna enačba izgube tal) skupino empiričnih modelov za oceno izgube tal zaradi erozije zastopajo modeli temelječi na USLE (*Universal Soil Loss Equation*, univerzalna enačba izgube tal). USLE je empirični model, ki se uporablja za oceno povprečne letne stopnje erozije tal (ton/enoto površine tal) za dano kombinacijo sistema rastlinskih kultur, praks upravljanja in agrotehničnih ukrepov, talnih tipov, padavinskih režimov in topografije. Model je bil razvit na kmetijskih poskusnih ploskvah v Združenih državah Amerike (Wischmeier in Smith 1978). Enačba modela predstavlja splošen matematično-empiričen izraz ocene izdatnosti erozije na izbrani površini:

$$E = Rf * Kf * Lf * Sf * Cf * Pf,$$

pri čemer je:  $E$  – povprečna letna izguba tal z vodno erozijo na enoto površine (t/ha leto),  $Rf$  – dejavnik erozivnosti padavin ( $\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{leto}^{-1}$ ),  $Kf$  – dejavnik erodibilnosti tal ( $\text{t}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ ),  $Lf$  – dejavnik dolžine pobočja (brez enot),  $Sf$  – dejavnik nagiba pobočja (brez enot),  $Cf$  – dejavnik pokrovnosti in rabe tal (brez enot) in  $Pf$  – dejavnik zaščitnih ukrepov (brez enot).

Model USLE uporabljajo v številnih državah, v različnih velikostnih okvirih ter različnih podnebnih območjih. USLE je kljub svojemu imenu (*»universal«*) najbolj primeren za srednje težka tla, pobočja dolžine do 122 m, nagibe med 3 % in 18 % ter tla, ki jih obdelujejo z običajnimi agrotehničnimi ukrepi. Standardna testna erozijska kmetijska površina je pravokotnik dolžine 22,1 m, širine 1,83 m z nagibom 9% (Wischmeier in Smith 1978).

Model USLE je bil večkrat nadgrajen (na primer RUSLE, RUSLE2 in MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*)). Model RUSLE vključuje nove padavinske erozijske karte ZDA in predvsem izboljšane algoritme obravnave različnih dejavnikov USLE (Renard in sodelavci 1997). Dodane so spremembe

ki erodibilnosti tal zaradi procesov zmrzovanja-odmrzovanja ter vlage tal pri metodi računanja dejavnikov pokrovnosti in obdelave tal, spremembe pri integraciji vpliva topografije ter posodobljene vrednosti za upoštevanje agrotehničnih ukrepov (Renard in Freimund 1994).

## 2.1 Dejavniki, ki določajo izdatnost vodne erozije

### 2.1.1 Erozivnost padavin (*Rf*)

Procesi erozije tal so ključno odvisni od kinetične energije padavin (Yin in sodelavci 2015). Erozivnost padavin določajo: intenziteta dežja in časovna razporeditev (mm/h), kinetična energija dežnih kapljic oziroma njihova razporeditev, velikost in hitrost padanja ter trajanje padavinskega dogodka. Merjenje kinetične energije padavin (*E*) zahteva napredne merilne naprave in posledično meritve niso zelo pogoste. Običajno specifično kinetično energijo padavin izračunavajo kot funkcijo intenzitete padavin (Petan 2010).

*Rf* je vhodna spremenljivka modela RUSLE, ki opredeljuje erozivnost padavin kot posledico količine ter intenzivnosti dežja in vodnega odtoka. *Rf* sta v sklopu metode USLE utemeljila Wischmeier in Smith (1965; 1978), kasneje pa so ga nadgrajevali Arnoldus (1980), Renard in sodelavci (1997), Loureiro in Coutinho (2001), Panagos in sodelavci (2015c) ter drugi. *Rf* ( $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{leto}^{-1}$ ) je podan kot letno povprečje vsote produktov kinetične energije padavin (*E*) in maksimalne 30-minutne intenzitete padavin ( $I_{30}$ ) erozivnih dogodkov (*ed*), ki so nastopili v daljšem časovnem obdobju trajanja *N* let:

$$R = \frac{\sum_{ed} E \cdot I_{30}}{N}$$

Petan (2010) je za Slovenijo na podlagi 31 pluviografskih merilnih mest Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) z vsaj 10-letnim nizom podatkov (1999–2008) in s 13 postaj z dnevним beleženjem količine padavin izdelal rastrski sloj letne erozivnosti padavin z ločljivostjo 100 m.

### 2.1.2 Eroditivnost tal (*Kf*)

Eroditivnost tal ( $\text{t}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) v modelu RUSLE izraža večje število lastnosti tal in predstavlja občutljivost tal za erozijo in stopnjo površinskega odtoka, merjena pri standardnih pogojih stanja površine. Lastnosti tal se spreminjajo tako v zelo kratkem (letni časi), kakor tudi v krajšem (nekaj let) in srednjem časovnem obdobju (nekaj deset, sto, tisoč let); oziroma so praktično nespremenljive. Na *Kf* vplivajo talne lastnosti: zrnavost tal, vsebnost talne organske snovi in struktura tal. Okvirne vrednosti *Kf* glede na zrnavost tal so za: lahka, pretežno peščena tla (0,007–0,053), srednje težka tla (0,033–0,053) in meljasta tla (prek 0,053) (NRCS 2014). V modelu RUSLE ni priporočljiva ekstrapolacija vrednosti *Kf* nad 4 % talne organske snovi.

### 2.1.3 Pokrovnost tal (*Cf*)

Pokrovnost tal opredeljuje vpliv rabe tal in s pokrovnostjo tal povezanih kmetijskih praks na erodibilnost tal. *Cf* je koeficient, ki kvantitativno oceni vpliv pokrovnosti tal in kmetijskih praks na erozijo glede na referenčne pogoje. Referenčne pogoje predstavlja zemljišče z golimi tlemi, orano vzporedno s pobočjem, kjer je vrednost *Cf* 1 (Panagos in sodelavci 2015b). *Cf* je glede protierozijskih ukrepov najpomembnejši dejavnik, saj ga je mogoče uravnavati prek ukrepov kmetijske politike in dobrih kmetijskih praks, ki zmanjšujejo razsežnost pojava erozije. Izračune *Cf* so opredelili različni avtorji (na primer Renard in sodelavci 1997; Van der Knijff, Jones in Montanarella 2000; Verstraeten in sodelavci 2001; Notebaert in sodelavci 2006; Djoukbal in sodelavci 2019). *Cf* upošteva vpliv predhodne rabe tal, rastlinski pokrov, zastiranje, hrapavost in vlažnost tal na mesečni ravni.

Zaradi kompleksnosti avtorji dejavnik pokrovnosti in rabe tal pogosto ocenijo tudi preprosteje – za izračun ne uporabljajo modelov, temveč dejavnik vežejo neposredno na vrsto rabe tal. V Sloveniji so obravnavali in praviloma *C<sub>f</sub>* vezali na vrsto rabe tal Bezak in sodelavci (2015), Petek (2017), Meden (2018) ter Komac in Pavlič (2017) Vrednosti *C<sub>f</sub>* glede na vrsto rabe tal omenjenih avtorjev povzema preglednica 1.

*Preglednica 1: Vrednosti C<sub>f</sub> izbranih avtorjev, pripisane vrstam rabe tal po evidencah Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP 2020) (\*vrednosti z nekaterimi spremembami povzeto po: Auerswald in Schmidt (1986), Richter (1991) in Petkovšek (2002); \*\* povzeto po Wischmeier in Smith 1978; \*\*\* vrednosti C za CLC-SI povzete po Panagos in sodelavci 2015b.)*

raba tal	Panagos in sodelavci 2015b (Craba)	Bezak in sodelavci 2015*	Komac in Pavlič 2017**	Meden 2018***
njive in vrtovi	–	0,100	0,035	0,136
hmeljišča	–	0,250	–	–
rastlinjak	–	–	0,0001	–
vinograd	0,15–0,45 (povprečno 0,3)	0,300	–	0,299
intenzivni sadovnjak	0,1–0,3 (povprečno 0,2)	0,300	–	0,150
ekstenzivni sadovnjak	0,1–0,3 (povprečno 0,2)	0,250	0,018	0,100
oljčnik (in podobna zemljišča)	0,1–0,3 (povprečno 0,2)	0,250	–	0,227
travnje	0,001–0,08 (povprečno 0,0405)	0,004	0,008	0,045
kmetijsko zemljišče	0,003–0,05 (povprečno 0,0265)	0,050	0,45	0,024
drevesa in grmičevje	–	–	0,009	–
kmetijsko zemljišče poraslo z gozdnim drevjem	–	–	0,1	–
neobdelano kmetijsko zemljišče	–	–	0,8	0,286
gozd	0,0001–0,003 (povprečno 0,00155)	0,002	0,001	0,001
pozidano zemljišče	–	0,000	0,001	–
barje	–	–	0,0001	–
trstičje	–	–	0,0001	–
ostala zamočvirjena zemljišče	–	–	0,0001	–
suho odprto zemljišče s posebnim rastlinskim pokrovom	0,1–0,45 (povprečno 0,275)	0,100	0,018	–
suho odprto zemljišče brez ali z neporaslim rastlinskim pokrovom	–	–	0,95	–

#### 2.1.4 Reliefni oziroma topografski dejavnik (*LSf*)

Dejavnik združuje dejavnika dolžine (*L*) in nagiba pobočja (*S*) ter predstavlja učinek topografije na stopnjo erozije (Van Remortel, Hamilton in Hickey 2001). Wischmeier in Smith (1978) sta opredelila *L* kot razdaljo od točke začetka površinskega toka do točke, kjer se *S* zmanjša toliko, da se začne odlaganje oziroma ko se vodni tok začne zbirati v kanalih.

### 2.2 Metode, orodja in podatki za izdelavo karte vodne erozije tal v Sloveniji

Uporabili smo **numerične metode** za izračun posameznih dejavnikov. Enačbe so predstavljene v okviru opisa posameznih dejavnikov. Kjer ni šlo drugače, smo se naslonili na ekspertna pedološka in empirična kmetijska znanja, strokovne razlage ter opredelitve posameznih količin, dejavnikov in kmetijskih agrotehničnih ukrepov.

Uporabili smo naslednja **GIS orodja** za prostorsko obdelavo podatkov in rastrsko modeliranje: *ESRI ArcGIS10*, *ArcWorkstation*, *QGIS* in *SAGA*. Izdelali smo avtomatizirane GIS algoritme; posebej tiste, ki jih je treba pognati v več iteracijah. Oblika rastrskih informacijskih slojev je bila predvsem *GEOTiff*.

**Uporabljeni podatki** v *RUSLE-SI* modelu so: digitalni model višin Slovenije (*DMV*) ločljivosti 12,5 m (*GURS 2005*), digitalna pedološka karta Slovenije 1 : 25.000 in podatki pedoloških profilov (*MKGP 2007a, b*), sloji zahtev kmetijskih subvencij za leta 2016, 2017, 2018 in 2019 (*ARSKTRP 2016–2019*), podatki rabe zemljišč (*MKGP 2016–2020*) in rastrski podatkovni sloj erozivnosti padavin (*Petan 2010b*).

## 3 Rezultati

Rezultati študije so predvsem metode GIS, tj. zasnova, postopki, implementacija algoritmov in izvedba slovenskim razmeram prilagojenega modela *RUSLE-SI* za oceno erozije ter rezultati numerične obdelave GIS, tj. rastrski informacijski sloji posameznih dejavnikov, *RUSLE-SI* rastrski sloj ocene izdatnosti erozije in grafične ponazoritve rezultatov modeliranja (zemljevidi). Omejenost dolžine prispevka omogoča predstavitev zgolj pglavitnih rezultatov.

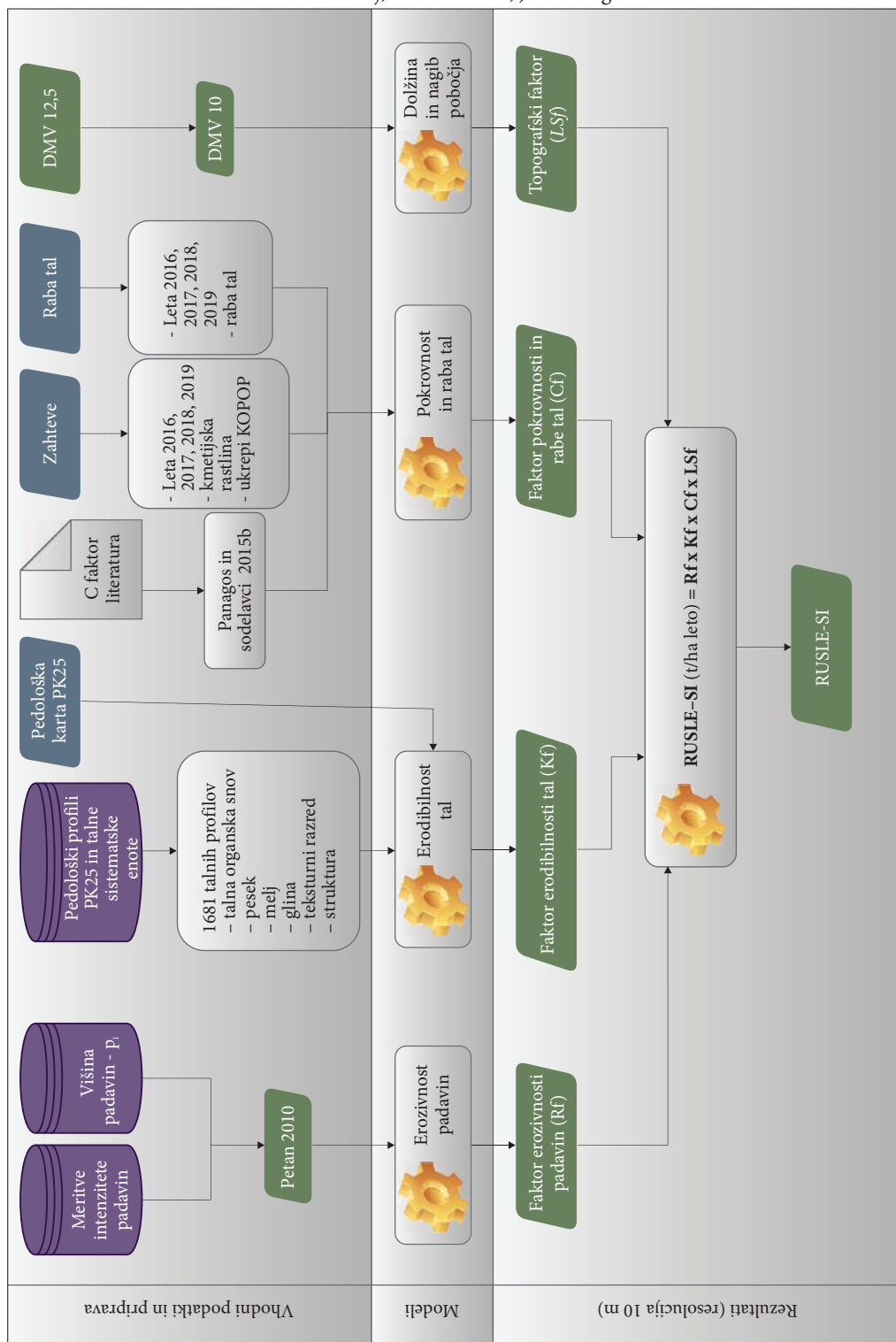
### 3.1 Metoda *RUSLE-SI* za oceno vodne erozije tal Slovenije

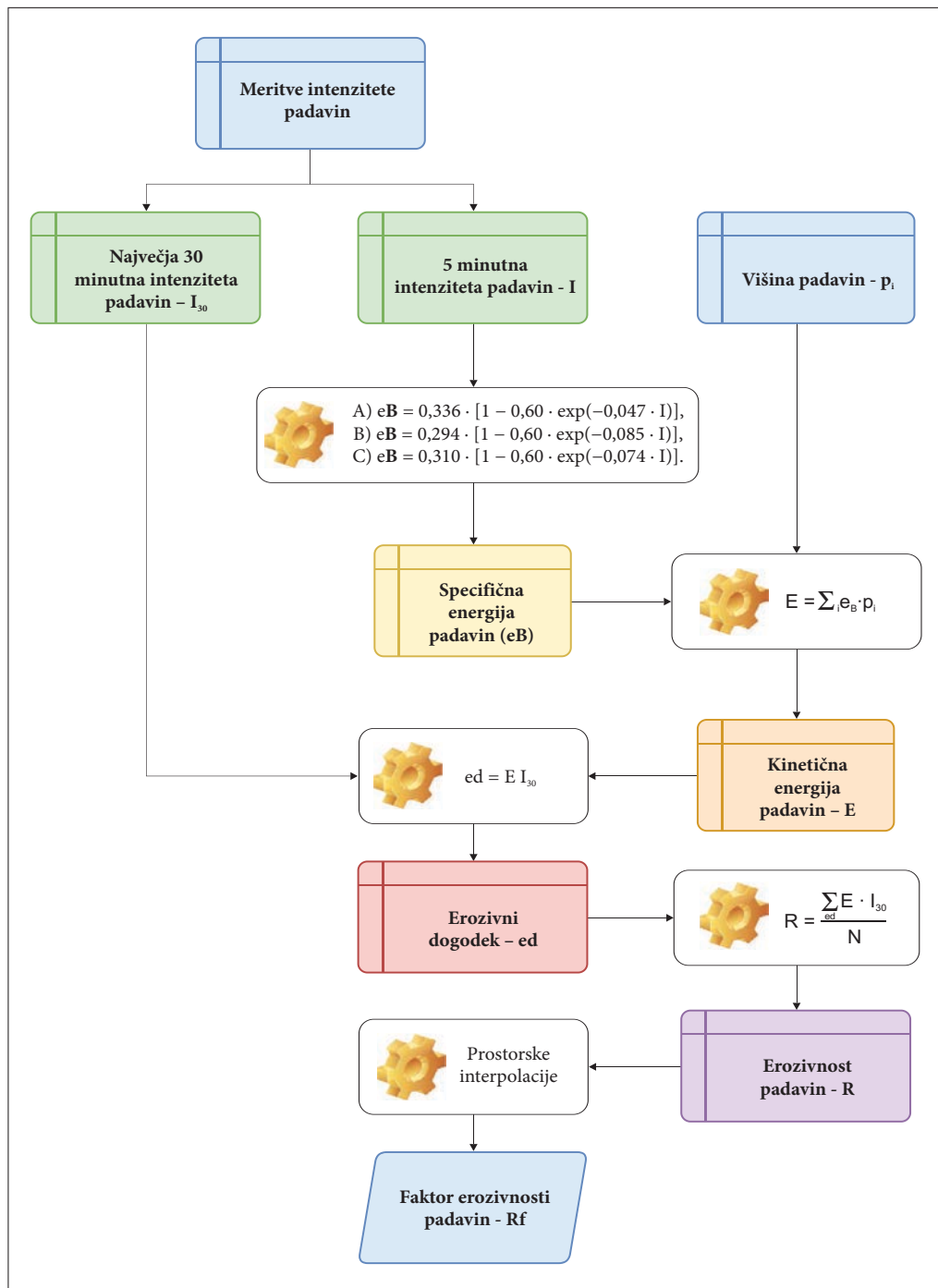
Pri razvoju metode *RUSLE-SI 2020* za oceno erozije tal v Sloveniji smo izdelali ločene prostorske modele in rastrske informacijske sloje petih dejavnikov: a) *Rf*: erozivnost padavin, b) *Kf*: erodibilnost tipa tal, c) *LSf*: relief (nagib in dolžina pobočij), d) *Cf*: pokrovnost in raba tal ter e) *Pf*: kmetijske prakse (obdelava tal). Izdelali smo GIS postopek, v katerega smo povezali posamezne module in algoritme (slika 1).

#### 3.1.1 Sloj erozivnosti padavin (*Rf*)

Sloj dejavnika erozivnosti padavin (*Rf*) je, kot rečeno, izračunal *Petan (2010)* na podlagi izpeljanih regresijskih povezav za izračun kinetične energije padavin in podatkov o merjenih intenzitetah padavin na pluviografskih postajah *ARSO* z vsaj 10-letnim nizom podatkov med letoma 1999 in 2008. Predpisano spodnjo mejo 12 mm za višino padavin znotraj posameznega erozivnega dogodka je znižal na 6 mm in tako zajel tudi manj intenzivne dežne dogodke. Z *ArcGIS* smo rastrske vrednosti pretvorili v točkovni sloj, slednjega pa smo interpolirali po metodi *IDW* in izdelali sloj *Rf* z ločljivostjo 10 m. Potek izračuna *Rf* prikazuje slika 2.

*Slika 1: Poenostavljen prikaz modela RUSLE-SI, modulov in uporabljenih vhodnih podatkov. ► (str. 60)*





Slika 2: Potek izdelave sloja erozivnosti padavin (Rf) modela RUSLE-SI.

### 3.1.2 Sloj erodibilnosti tal ( $K_f$ )

Pregledali smo podatke 1681 talnih profilov.  $K_f$  smo izračunali na podlagi enačbe:

$$K_f = \{ [2,1 \times (10 - 4) \times M1,14 \times (12 - OS)] + [3,25 \times (s - 2)] \times (p - 3) \} / 100 \times 0,1317,$$

pri čemer je:  $K_f$  – erodibilnost tal [ $t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ ],  $M$  – velikost talnih delcev (delež melja, delež finega peska in delež gline),  $OS$  – organska snov (%),  $s$  – razred strukture tal in  $p$  – razred prepustnosti tal.

Enačba je povzeta po Wischmeierju in Smithu (1978) ter Renardu in sodelavcih (1997), uporabili pa so jo tudi Panagos in sodelavci (2014).  $K_f$  smo izračunali za površinske pedogenetske horizonte in z upoštevanjem njihove debeline izračunali  $K_f$  tal za erozivno globino tal (0–20 cm). Potek izračuna  $K_f$  prikazuje slika 3.

Delež finega peska v vzorcih tal ni bil merjen, zato smo po zgledu Panagosa in sodelavcev (2014) ocenili, da ga je v tleh glede na delež skupnega peska 20 %. Parameter strukture tal, ki vpliva na erodibilnost padavin in je podan v razredih od 1 do 4, smo prevedli na standardne oblike strukturnih agregatov. Kombinacij načina zapisa oblike strukturnih agregatov talnih horizontov je veliko, zato smo vsaki kombinaciji pripisali harmonizirano opredelitev, ki je ustrezala standardnim oblikam strukturnih agregatov. Parameter prepustnosti tal ima šest razredov, pri čemer 1 pomeni zelo dobro prepustna tla in 6 zelo slabo prepustna tla. Vrednosti so opredeljene za 12 teksturnih razredov tal.

### 3.1.3 Sloj pokrovnosti in rabe tal ( $C_f$ )

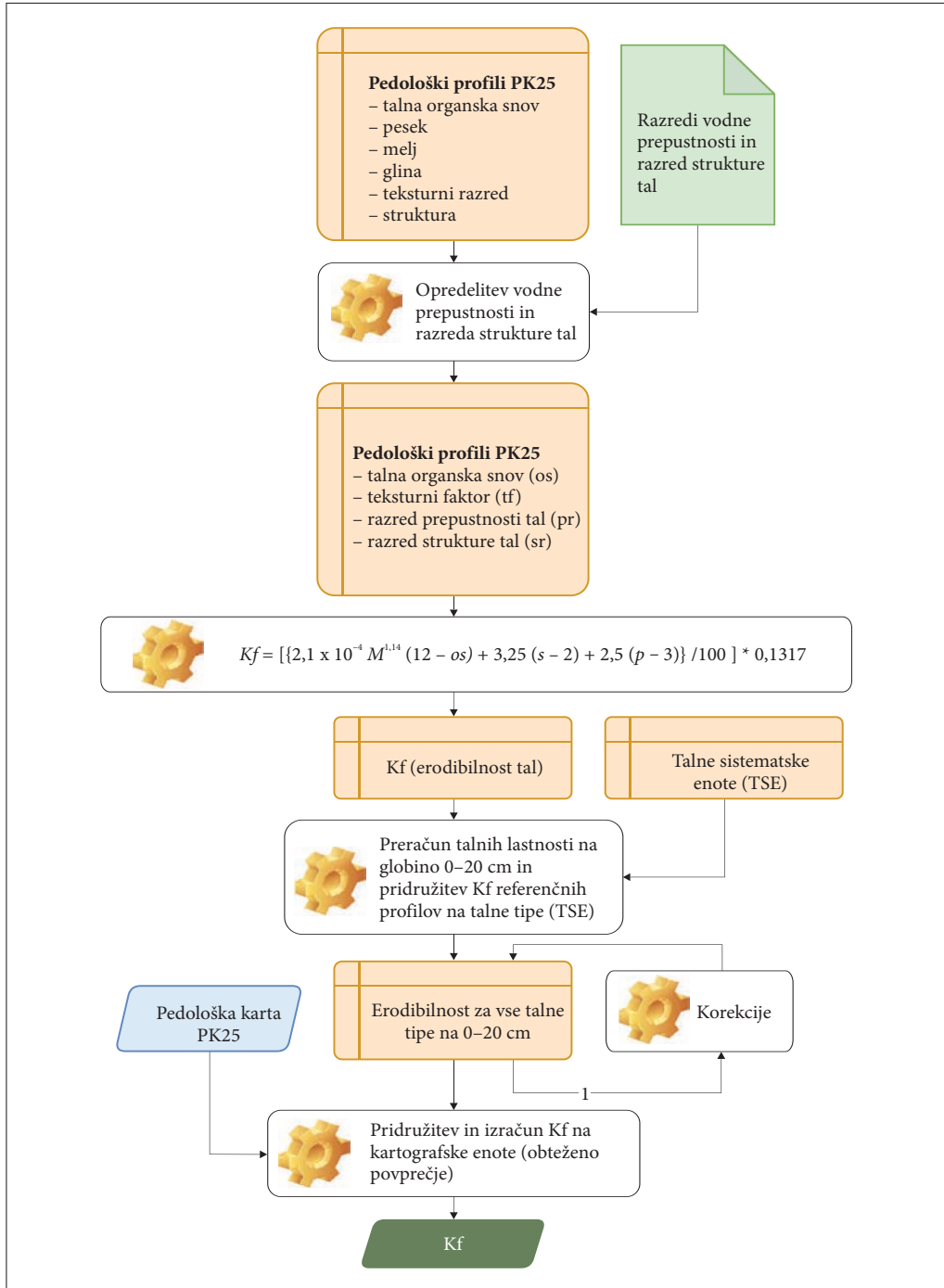
Dejavnik pokrovnosti in rabe tal smo izdelali tako, da smo referenčne vrednosti dejavnika  $C$  za 17 njivskih kultur povzeli iz literature na ravni Evrope (Panagos in sodelavci 2015b) ter jih pripisali na prostorski sloj kmetijskih rastlin Slovenije (v nadaljevanju KR) za obdobje 2015–2019 (ARSKTRP 2015–2019) (*Crastlina*). Zajeli smo tiste KR, ki so v omenjenem obdobju v kumulativnem deležu obsegale 98 % površin, ločeno kot glavni posevek, prezimni posevek in neprezimni posevek. Območja, ki niso v evidenci subvencijskih GERK površin, nimajo podatka o KR, zato smo ta območja zajeli s slojem rabe zemljišč, ki pokriva celotno Slovenijo. Območjem smo pripisali srednjo vrednost dejavnika  $C$  (Wischmeier in Smith 1978; Auerswald in Schmidt 1986; Richter 1991; Bezak in sodelavci 2015; Panagos in sodelavci 2015b) za neobdelovalna zemljišča iz kategorij pokrovnosti rabe tal *Corine Land Cover* (CLC). Kategorije smo prevedli na vrste slovenske rabe tal iz sloja Raba tal (MKGP 2016–2019) ter parameter poimenovali *Craba*. Vrednosti, za katere smo na podlagi agrotehničnih in empiričnih znanj presodili, da srednja vrednost po Panagosu in sodelavcih (2015b) ne ustreza lastnostim slovenske rabe tal, smo vrednost *Craba* ekspertno prilagodili.

Vrednosti *Crastlina* smo preko šifre rastline vezali na prostorski sloj njivskih GERK zemljišč (ARSKTRP 2016–2019), vrednosti *Craba* pa smo preko RABA ID vezali na prostorski sloj rabe tal za leta 2016–2019 za celotno površino Slovenije (MKGP 2016–2019). Prostorske podatke GERK zemljišč smo glede na rabo razdelili v štiri skupine: **njivska zemljišča**, **vinogradi**, **sadovnjaki** (intenzivni sadovnjaki in oljčniki) in **ostala raba**.

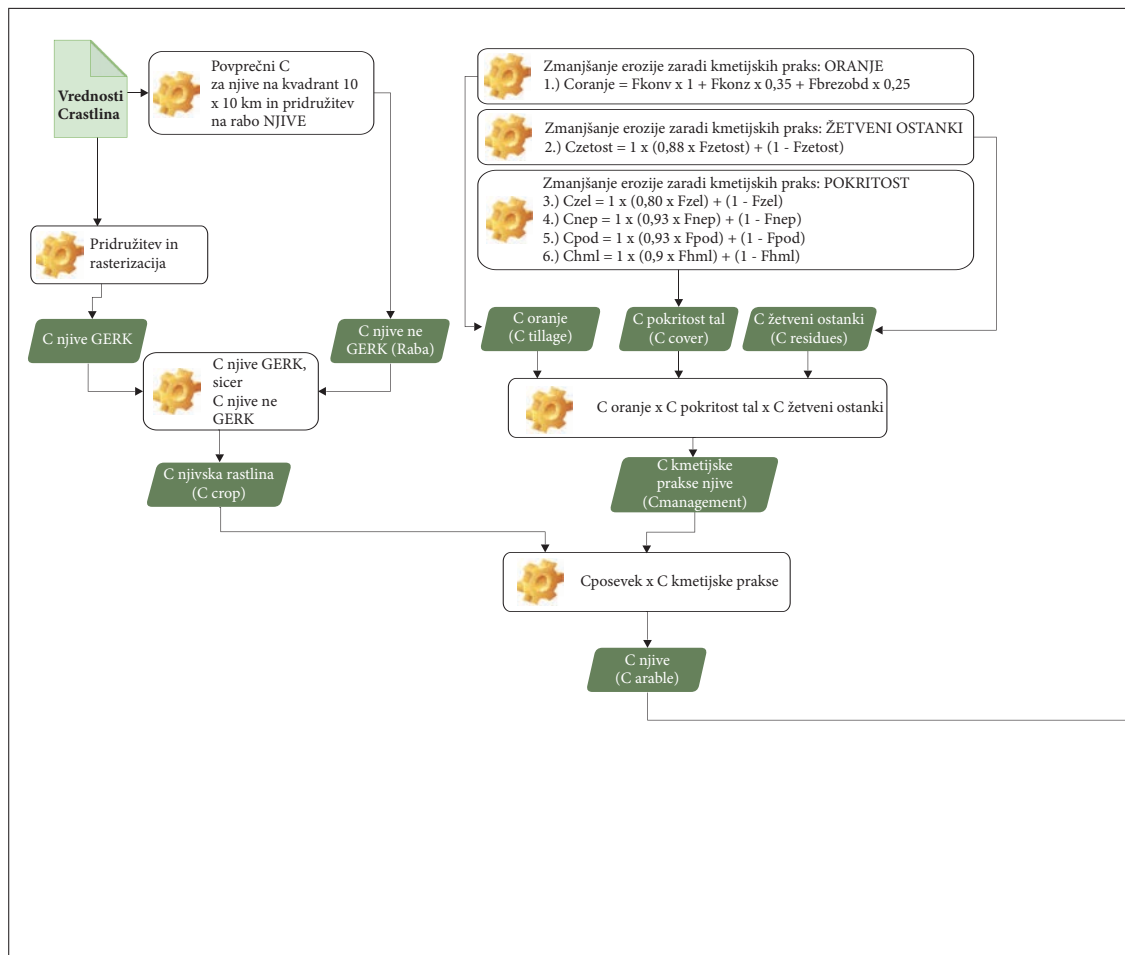
*Crastlina* in *Craba* smo prilagodili z dejavniki kmetijskih praks, ki pripomorejo k zmanjševanju erozije: ohranitvena obdelava tal, setev rastlin za podor, ozelenitev njivskih površin, neprezimni medonosni posevki na njivah ter pokritost v medvrstnem prostoru v sadovnjakih, vinogradih in hmeljiščih.

Iz referenčnih vrednosti *Crastlina* in *Craba* in iz vseh kmetijskih praks smo izdelali rastrske sloje za območje Slovenije v ločljivosti 10 m in v skladu z metodologijo izdelali sloje  $C_f$  za: njivska zemljišča, vinograde, sadovnjake in ostalo rabo tal. V zadnjem koraku smo sloje prostorsko združili v sloj dejavnika  $C$  ( $C_f$ ). Končni  $C_f$  smo izračunali kot povprečje  $C_f$  za leta 2016–2019 (slika 4).





Slika 3: Potek izdelave sloja erodibilnosti tal (Kf) v modelu RUSLE-SI.



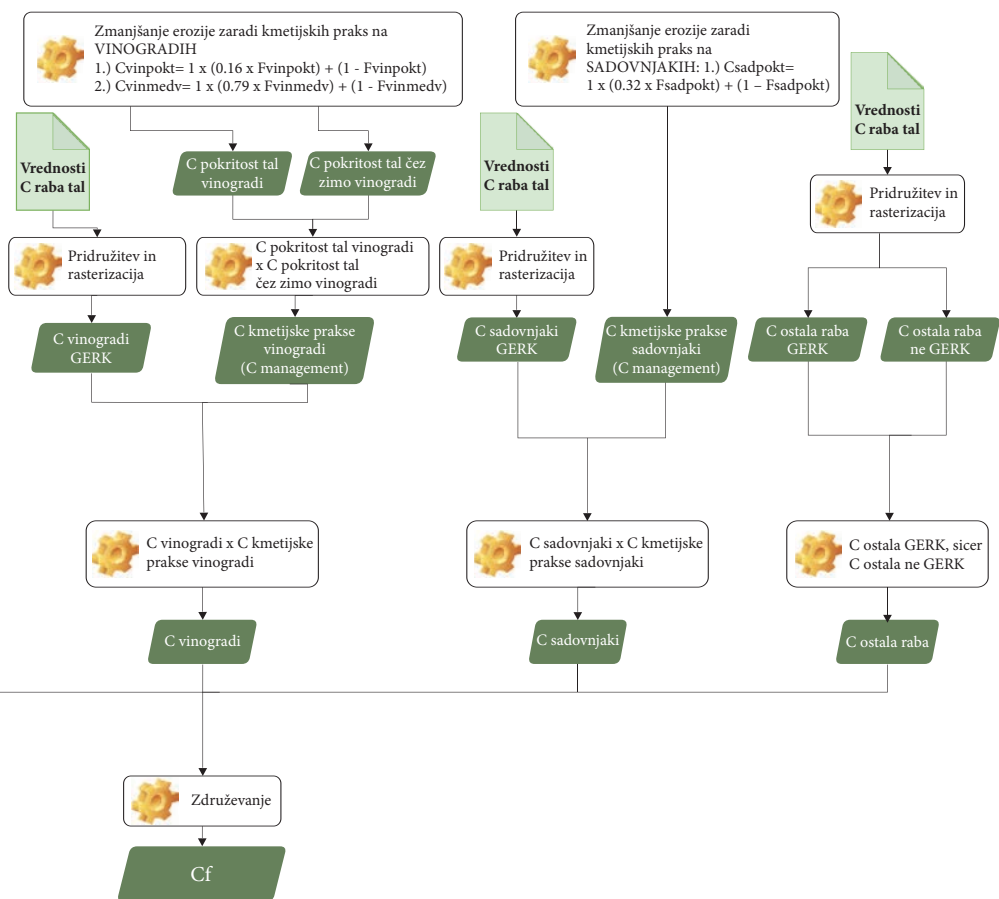
Slika 4: Potek izdelave sloja pokrovnosti in rabe tal v modelu RUSLE-SI.

### 3.1.4 Sloj topografskega dejavnika (LSf)

Metodologija za izračun dejavnikov dolžina pobočja ( $L$ ) in nagiba pobočja ( $S$ ) ter združenega topografskega dejavnika ( $LS$ ) vključuje rastrski sloj DMV v ločljivosti 12,5 m (GURS 2005), prilagojen algoritem, ki sta ga razvila Desmet in Govers (1996) (slika 5) ter omejitvev izračuna za območja z nagibom do 50 % (26,6°).  $LSf$  smo s programom SAGA izdelali z uporabo hidrološkega modula  $LS$  Factor (*One Step*), ki združuje predobdelavo DMV (zapolnitev lokalnih depresij), akumulacijo površinskega toka, določitev specifičnega prispevnega območja, nagib pobočja in končni izračun  $LSf$  po algoritmu Desmeta in Goversa (1996) ter Panagosa, Borellija Meusburgerja (2015).

Izračun dejavnika  $LS$  je potekal po naslednji enačbi:

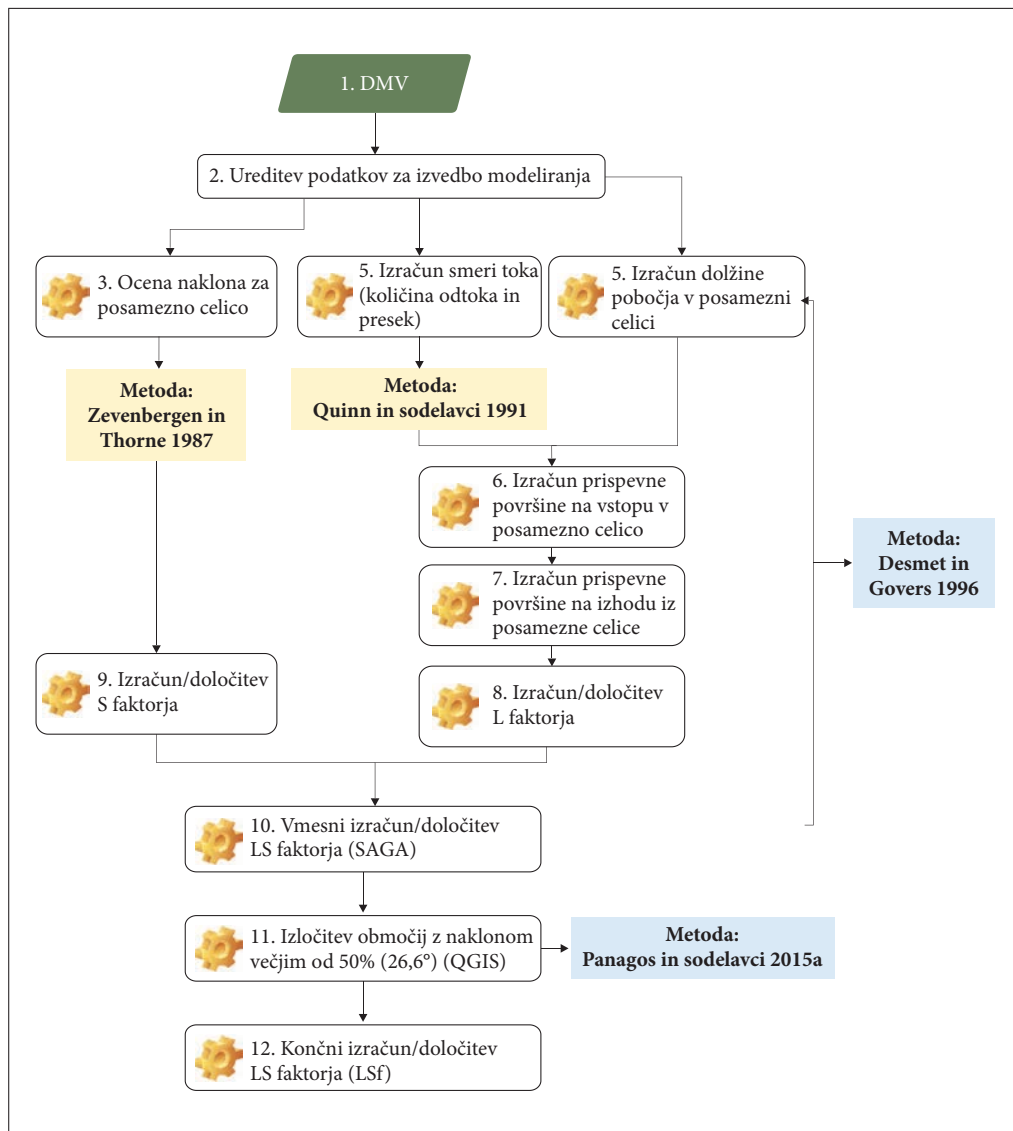
$$LS_j = \frac{S_j \times (\lambda_j^{(m+1)} - \lambda_{j-1}^{(m+1)})}{(\lambda_j - \lambda_{j-1}) * (22,13)^m},$$



pri čemer je:  $L$  – dejavnik dolžine pobočja,  $S_j$  – dejavnik nagiba pobočja za  $j$ -segment,  $\lambda_j$  – razdalja od spodnje meje  $j$ -segmenta do meje na vrhu hriba in  $m$  – eksponent dolžine USLE  $LS_f$ .

### 3.1.5 Sloj zaščitnih ukrepov ( $P_f$ )

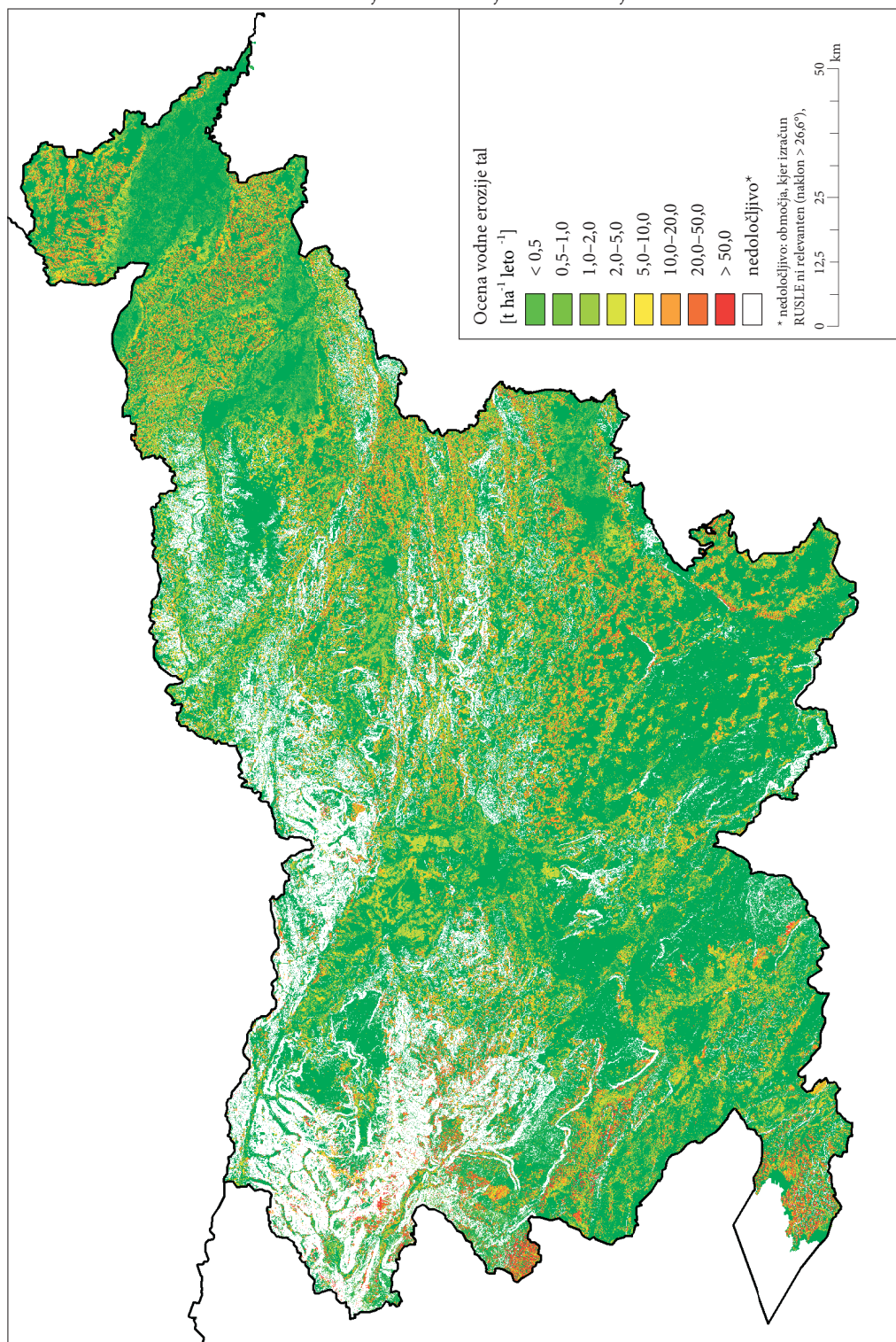
Pestrost dejavnikov kmetijske rabe ter pomanjkanje specifičnih podatkov o izvedenih agrotehničnih ukrepih in uporabljenih kmetijskih praksah ne omogočajo natančne prostorske ocene in opredelitve posameznih kmetijskih agrotehničnih ukrepov. Zaradi pomanjkanja podatkov smo pri izdelavi modela RUSLE-SI za  $P_f$  privzeli vrednost 1. S podobnimi težavami so se srečali tudi raziskovalci v Avstriji (Schmaltz in sodelavci 2020), ki so prav tako za  $P_f$  prevzeli vrednost 1. Ta »prisilna skladnost« z avstrijskim erozijskim modelom pa ima tudi pozitivno posledico, saj omogoča primerljivost končnih podatkov – erozijskih procesov med dvema podnebno in reliefno primerljivima sosednjima državama.



Slika 5: Potek izračuna dolžine pobočja (L), nagiba pobočja (S) in izdelave topografskega dejavnika (LS) v modelu RUSLE-SI.

Slika 6: Ocena vodne erozije tal za Slovenijo po metodi RUSLE-SI – območja nagibov < 50 %. ► (str. 67)

# Modeliranje vodne erozije tal v Sloveniji



## 4 Razprava in sklepi

### 4.1 GIS metodologija, algoritmi in baze podatkov

Erozijo tal za Slovenijo smo ocenili po metodi RUSLE-SI (slika 6), pri čemer smo se naslonili na metodološka izhodišča metode RUSLE2015 po Panagosu in sodelavcih (2015a). Metodo RUSLE smo prilagodili dostopnim prostorskim podatkom Slovenije, ki so bistveno večje prostorske in vsebinske natančnosti, kot so jih uporabili Panagos in sodelavci (2015a).

Postopek izdelave RUSLE-SI modela ločimo na pripravo podatkov, izdelavo podmodelov za vsakega od dejavnikov RUSLE, zagon modela RUSLE in obdelavo rezultatov. Časovno najbolj zahtevna je bila priprava podatkov in izdelava logičnih algoritmov za vsak dejavnik enačbe RUSLE. V sak izmed njih je namreč zahteval svoje vhodne podatke in specifično pripravo. V primerjavi s sorodnimi modelirani erozije za Slovenijo smo vsebinsko izpopolnili predvsem dejavnika rabe in pokrovnosti tal (*Cf*) ter erodibilnosti tal (*Kf*).

Večinoma smo uporabljali *ArcGIS ArcInfo* programski paket, postopke pa poskusili v veliki meri avtomatizirati s pisanjem skriptnih datotek *ArcPy*. Za izdelavo *LSf* smo uporabili programski paket *SAGA*. Za vsak dejavnik modela RUSLE je nastal prostorski model in geoinformacijski sloj, ki je nato vstopil v model RUSLE. Rezultat je geoinformacijski sloj povprečne letne erozije tal v Sloveniji v rastrskem formatu ločljivosti 10 m v koordinatnem sistemu EPSG: 3912.

### 4.2 Ocena stopnje erozije po rabah tal

Povprečna stopnja erozije tal v Sloveniji je 3,68 t/ha letno, a močno variira (med 0 in 3,519 t/ha letno). Stopnja erozije je prostorsko izrazito neenakomerno porazdeljena, saj je na 60 % površin Slovenije (okrog 1.200.749 ha) erozija nižja od 0,5 t/ha letno. Najvišjo povprečno erozijo (17,79 t/ha letno) pričakujemo v trajnih nasadih (oljčniki, vinogradi in sadovnjaki). Sledijo njive in vrtovi oziroma obdelovalna zemljišča (povprečna vrednost 7,58 t/ha letno). Nepričakovano izdatno erozijo izkazuje travinje (6,82 t/ha letno), zelo nizko erozijo pa izkazujejo gozdovi (0,43 t/ha letno). Ocena erozije tal za celotno območje Slovenije, ki smo jo pridobili z modelom RUSLE-SI (3,68 t/ha letno), je primerljiva z rezultati, ki so jih v preteklosti za Slovenijo izračunali drugi avtorji (glej Komac in Zorn 2007) in je 3,88 t/ha. Povprečna erozija po modelu RUSLE-SI je 50% nižja od izračuna erozije Panagosa in sodelavcev (2015a) (7,42 t/ha leto), ki je bil sicer izhodišče našega modeliranja.

Model RUSLE-SI smo uporabili na celotnem ozemlju Slovenije, posebej pa smo izločili območja z nagibom večjim od 50 % (slika 6), kar je 345.624 ha (17 % Slovenije). Ob neupoštevanju območij z nagibom večjim od 50 % je povprečna letna izguba tal v Sloveniji za 58 % nižja od ocen Panagosa in sodelavcev (2015a), in sicer 3,13 t/ha letno. Najbolj (za 81 %) so se znižale vrednosti na območjih ostalih nekmetijskih zemljišč (2,08 t/ha letno) ter v gozdovih, kjer smo ocenili 33 % nižje vrednosti, in sicer na 0,29 t/ha letno. Na KZ z upoštevanjem le območij do 50 % nagiba vrednosti erozije niso bistveno nižje. V trajnih nasadih so vrednosti nižje za 2 % (iz 17,79 na 17,36 t/ha letno), pri njivah pa do sprememb ni prišlo. Zlasti na travinju smo pričakovali večji upad, a se je ocena erozije znižala le za 10 % (iz 6,82 na 6,13 t/ha letno).

*ZAHVALA: Avtorji se zahvaljujemo Ministrstvu za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano Republike Slovenije za javno naročilo in financiranje študije ocene intenzivnosti erozije tal v Sloveniji. Dr. Boštjanu Petelincu se zahvaljujemo za tvorno sodelovanje pri izvedbi naloge. ARSKTRP se zahvaljujemo za podatke zbirnih vlog. Zahvaljujemo se kolegu Marjanu Šinkovcu za sodelovanje pri izvedbi raziskave in prispevku k poročilu strokovne naloge, ki je služilo tudi za pripravo tega prispevka.*

## 5 Viri in literatura

- ARSKTRP 2015–2019: Prostorski sloji zahtev za leta 2015–2019. Agencija Republike Slovenije za kmetijske trge in razvoj podeželja. Ljubljana.
- Auerswald, K., Schmidt, F. 1986: Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern – Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen. GLA Fachberichte 1. München.
- Arnoldus, H. M. J. 1980: An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. Assessment of Erosion. New York.
- Bezak, N., Rusjan, S., Petan, S., Sodnik, J., Mikoš, M. 2015: Estimation of soil loss by the WaTEM/SEDM model using an automatic parameter estimation procedure. *Environmental Earth Sciences* 74. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4534-0>
- Desmet, P. J. J., Govers, G. 1996: A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51-5.
- Djoukbala, O., Hasbaia, M., Benselama, O., Mazour, M. 2019: Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment* 5. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0562-6>
- FAO 2019: Soil Erosion: the greatest challenge for sustainable soil management. Rome.
- GURS 2005: Digitalni model višin resolucije 12,5 m. Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana. Medmrežje: <https://egp.gu.gov.si/egp/> (10. 10. 2020).
- Komac, M., Pavlič, M. 2017: Nadgradnja ploskovnega erozijskega modela z območji erozije v strugah – primer občine Bohinjska. *Geologija* 60-2. DOI: <https://doi.org/10.5474/geologija.2017.017>
- Komac, B., Zorn, M. 2007: Meritve in modeliranje erozije prsti v Sloveniji. Strategija varovanja tal v Sloveniji. Ljubljana.
- Loureiro, N. S., Coutinho, M. A. 2001: A new procedure to estimate the RUSLE EI30 index, based on monthly rainfall data and applied to the Algarve region, Portugal. *Journal of Hydrology* 250, 1-4. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00387-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00387-0)
- Meden, J. 2018: Modeliranje erozije prsti z modelom RUSLE v katastrski občini Neblo. Magistrsko delo, Oddelek za geografijo Filozofske fakultete. Ljubljana.
- MKGP 2007a: Digitalna pedološka karta Slovenije 1 : 25.000 (DPK). Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. Ljubljana.
- MKGP 2007b: Podatki pedoloških profilov (PP). Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. Ljubljana.
- MKGP 2016–2019: Podatki rabe tal (RABA). Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. Ljubljana.
- Notebaert, B., Vaes, B., Verstraeten, G., Govers, G., Van Oost, K., Van Rompaey, A. 2006: WaTEM/SEDEM version 2006 Manual. KU Leuven. Medmrežje: <https://ees.kuleuven.be/eng/geography/modelling/watemedem2006/> (24. 6. 2022).
- NRCS 2014: National Soil Erosion Results Tables. Medmrežje: <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/technical/?cid=stelprdb1041678> (12. 10. 2020).
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, C. 2015a: The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science and Policy* 54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, C., Alewell, C., Lugato, E., Montanarella, L. 2015b: Estimating the soil erosion cover-management factor at European scale. *Land Use Policy* 48 C. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
- Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., Rousseva, S., Perčec Tadić, M., Michaelides, S., Hrabalíková, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumitrescu, A., Beguería, S., Alewell, C. 2015c: Rainfall erosivity in Europe. *Science of The Total Environment* 511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>

- Panagos, P., Borelli, P., Meusburger, K. 2015: A New European slope length and steepness factor (LS Factor) for modeling soil erosion by water. *Geosciences* 5-2. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>
- Panagos, P., Karydas, C. G., Ballabio, C., Gitas, I. Z. 2014: Seasonal monitoring of soil erosion at regional scale: An application of the G2 model in Crete focusing on agricultural land uses. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 27B. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.09.012>
- Petan, S. 2010: Meritve in prostorsko modeliranje erozivnosti padavin kot parametra erozije tal. Doktorsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Ljubljana.
- Petek, M. 2017: Analiza erozivnosti padavin v Sloveniji. Magistrsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Ljubljana.
- Petkovšek, G. 2002: Kvantifikacija in modeliranje erozije tal z aplikacijo na povodju Dragonje. Doktorsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Ljubljana
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., Yoder, D. C. 1997: *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington D.C.
- Renard, K., Freimund, J. R. 1994: Using monthly precipitation data to estimate R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology* 157, 1-4. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Richter, G. 1991: The soil erosion measurement station and its program. *Forschungsstelle Bodenerosion* 10.
- Schmaltz, E., Dersch, G., Weinberger, C., Krammer, C., Strauss, P. 2020. Soil erosion in Austria – National calculations using regional data delivering local results for the ÖPUL programme. EGU General Assembly 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-21695>
- Van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., Montanarella, L. 2000: Soil Erosion Risk Assessment in Europe. *Ispra. Medmrežje*: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-erosion-risk-assessment-europe> (24. 6. 2022).
- Van Remortel, R. D., Hamilton, M. E., Hickey, R. J. 2001: Estimating the LS Factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data within ArcInfo Grid. *Cartography* 30-1. DOI: <https://doi.org/10.1080/00690805.2001.9714133>
- Verstraeten, G., Van Oost, K., Van Rompaey, A., Poesen, J., Govers, G. 2001: *Integraal Land – en Waterbeheer in Landelijke Gebieden met het Oog op het Beperken van Bodemverlies en Modderoverlast (Proefproject Gemeente Gingelom)*. Leuven.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D. 1965: *Predicting Rainfall – Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation*. Agriculture Handbook 282. Washington D.C. *Medmrežje*: <https://handle.nal.usda.gov/10113/CAT87208342> (24. 6. 2022).
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D. 1978: *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Science. Agriculture Handbook 537. Washington D.C. *Medmrežje*: <https://handle.nal.usda.gov/10113/CAT79706928> (24. 6. 2022).
- Yin, S., Xie, Y., Liu, B., Nearing, M. A. 2015: Rainfall erosivity estimation based on rainfall data collected over a range of temporal resolutions. *Hydrology and Earth System Sciences* 19-10. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-19-4113-2015>
- Zorn, M. 2015: Erozijski prsti – prezrt okoljski problem. *Geografski obzornik* 63, 2-3.