



REGIONE TOSCANA

Direzione Generale Politiche Territoriali e Ambientali

SETTORE SERVIZIO IDROLOGICO REGIONALE



**PROGETTO GENERALE DI MONITORAGGIO
DEL TRASPORTO SOLIDO NEI CORSI D'ACQUA TOSCANI**

Relazione
Tecnica n.2

**DATI TERRITORIALI
E MODELLO DI ERODIBILITA'**

Responsabile:
Prof. Ing. Enio Paris

Collaboratore:
Dott. Ing. Alessandro Moscatelli

Novembre 2005

Indice

1. PREMESSA	3
2. MODELLO USLE/RUSLE.....	7
2.1 Fattore di erosività di pioggia e deflusso	9
2.2 Fattore di erodibilità.....	12
2.3 Fattore di copertura vegetale e di uso del suolo	12
2.4 Fattore di tecniche sistematorie e conservazione del suolo.....	13
2.5 Fattore topografico	14
3. I DATI IN INGRESSO AL MODELLO.....	16
3.1 I dati puntuali	16
3.2 I dati distribuiti.....	19
4. I DATI DERIVATI	20
4.1 Elaborazione della mappa delle quote.....	20
4.2 Elaborazione della mappa della geolitologia	23
4.3 Elaborazione della mappa dell'uso del suolo	25
4.4 Elaborazione dei dati puntuali di precipitazione.....	26
4.4.1 Stima dell'altezza di precipitazione per assegnata durata e tempo di ritorno	26
4.4.2 La distribuzione di probabilità TCEV.....	27
4.4.3 Stima dei parametri per durate superiori all'ora.....	30
4.4.4 Calcolo dell'R-Factor.....	31
4.4.5 Il metodo dell'inverso della distanza	34

5.	GENERAZIONE DELLA MAPPA DELL'ERODIBILITÀ	35
6.	COEFFICIENTE DI RESA SOLIDA	37
6.1	Le curve utilizzate in letteratura	38
6.2	La stima del Sediment Delivery Ratio	41
7.	APPENDICE 1: LE STAZIONI PLUVIOMETRICHE	44
8.	APPENDICE 2: CONVERSIONE DELLE UNITÀ DI MISURA.....	53
9.	APPENDICE 3: DATI TERRITORIALI A SCALA DI BACINO	56
10.	BIBLIOGRAFIA.....	57

1. PREMESSA

A seguito dell'incarico affidato allo scrivente dal Servizio Idrologico Regionale – Direzione Generale delle Politiche Territoriali in data 1 febbraio 2005 con D.D. n. 8414 del 13/12/2004, avente per oggetto la redazione del “Progetto Generale di Monitoraggio del Trasporto Solido nei corsi d’acqua della Toscana”, nella presente Relazione Tecnica si illustrano le caratteristiche delle attrezzature e della strumentazione come previste dal Progetto Generale di Monitoraggio descritto nella Relazione Tecnica Generale.

Gli obiettivi di riferimento del “Progetto Generale di Monitoraggio del Trasporto Solido nei corsi d’acqua della Toscana” risultano, in sintesi, i seguenti:

- A. **analisi delle attuali attività di misura, dei rilievi fluviali, e dei dati disponibili:** tale fase comprende la raccolta delle informazioni sulle attività di monitoraggio fluviale con riferimento sia all’organizzazione e gestione della rete e delle attrezzature in ambito regionale ed extra-regionale, sia alla disponibilità dei dati idrometrici, topografici e sedimentologici per i corsi d’acqua ricadenti nel territorio regionale;
- B. **strategie di monitoraggio:** tale fase comprende lo sviluppo di strategie generali di monitoraggio in relazione alle principali finalità (rischio idraulico, risorse idriche, protezione civile, pianificazione), nonché alle priorità, alle risorse, alle caratteristiche territoriali, alle attività esistenti e programmate;
- C. **definizione delle tipologie di misura:** tale fase definisce le grandezze fisiche oggetto del monitoraggio, le attrezzature di misura e le loro caratteristiche, le modalità di esercizio e/o di installazione, i criteri di integrazione con il sistema attuale di monitoraggio;

D. **definizione degli standard qualitativi di misura:** tale fase è finalizzata all'individuazione delle metodologie idonee alla caratterizzazione delle grandezze fisiche di interesse attraverso un apposito protocollo di operazioni e attività, finalizzate all'acquisizione di dati significativi e omogenei (es.: frequenza spazio-temporale delle misure, modalità di campionamento, archiviazione ed elaborazione dei dati);

E. **taratura delle stazioni e restituzione del dato:** in tale fase vengono definite le procedure di taratura delle stazioni di misura (scala di deflusso liquida e solida), nonché i criteri per la validazione e restituzione dei dati rilevati;

Nell'ambito degli obiettivi sopra richiamati, il presente studio ha affrontato in particolare:

- l'individuazione delle stazioni significative in ambito regionale per la loro predisposizione e inserimento nella rete di monitoraggio (OBIETTIVO A);
- le caratteristiche fisiche, strumentali e territoriali di ciascuna stazione significativa e del tratto fluviale di afferenza (OBIETTIVO A);
- la descrizione delle caratteristiche fisiche dei bacini sottesi dalle stazioni significative, attraverso la predisposizione di carte tematiche relative al DTM, uso del suolo, geolitologia, reticolo idrografico (OBIETTIVO A);
- l'elaborazione dei dati territoriali per la realizzazione della carta dell'erodibilità per ciascun bacino considerato (OBIETTIVO A);
- la definizione dei rilievi integrativi necessari alla completa caratterizzazione delle stazioni significative e dei tratti fluviali di interesse (OBIETTIVO B);
- la definizione delle principali strategie di monitoraggio (OBIETTIVO B);

- lo schema del progetto di monitoraggio (OBIETTIVO B);
- le caratteristiche di funzionamento, di impiego e di installazione delle attrezzature di monitoraggio (OBIETTIVI C e D).

Per quanto attiene agli obiettivi A e B, si ritiene che quanto sviluppato nell'ambito del presente studio sia già ad un livello adeguato per avviare la fase esecutiva del progetto stesso. I dettagli circa le specifiche esigenze di installazione di particolari attrezzature nelle sezioni di monitoraggio potranno essere definiti solo nella fase esecutiva e di concerto con il Servizio Idrografico.

Le attività connesse al raggiungimento degli obiettivi C e D vengono descritte nel presente studio ad un dettaglio sufficiente a definire le caratteristiche di funzionamento, di impiego e di installazione delle attrezzature di monitoraggio previste. Ulteriori approfondimenti e dettagli operativi saranno forniti attraverso la predisposizione di apposite *Linee Guida per il Monitoraggio del Trasporto Solido* (in corso di attuazione) e di un corso di formazione per operatori addetti al monitoraggio (in corso di realizzazione).

Per quanto riguarda l'obiettivo E, questo può solo essere raggiunto avviando quanto prima le fasi operative del progetto di monitoraggio, come descritto nella Relazione Tecnica Generale del presente studio.

Nella presente Relazione tecnica vengono descritte le caratteristiche fisiche dei bacini sottesi dalle stazioni significative, attraverso la predisposizione di carte tematiche relative al DTM, uso del suolo, geolitologia, reticolo idrografico.

Viene inoltre descritta la metodologia utilizzata per la realizzazione della carta dell'erodibilità per ciascun bacino considerato. In particolare, si espongono le basi teoriche, la struttura, gli algoritmi di calcolo e le procedure di raccolta ed elaborazione dei dati di input per la valutazione della erosione media annua nei bacini di interesse.

La sequenza delle attività svolte ha compreso in sintesi:

- la raccolta dei dati pluviometrici (linee segnalatrici di possibilità pluviometrica) e torbiometrici relativi ai bacini di interesse;
- La raccolta dei dati morfometrici, di uso del suolo e delle formazioni geolitologiche;
- La generazione dei dati necessari all'implementazione del modello per la valutazione della erosione media annua nei bacini di interesse;
- L'implementazione del modello RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*);
- La determinazione del coefficiente di resa solida (Sediment Delivery Ratio - SDR).

La conoscenza dei fenomeni di produzione del materiale solido dalle diverse realtà territoriali regionali appare un elemento di fondamentale importanza da affiancare alle misure di campo del trasporto solido, verso la realizzazione di un modello integrato afflussi-deflussi solido in grado di simulare, una volta tarato, i complessi fenomeni di dinamica dei versanti e dinamica d'alveo che, interagendo con le attività umane sul territorio, determinano le caratteristiche evolutive del territorio, interno e costiero, in base alle quali devono essere definite le strategie di pianificazione, manutenzione, progettazione, gestione e realizzazione degli interventi.

2. MODELLO USLE/RUSLE

Il modello utilizzato è quello elaborato da Wischmeier e Smith nel 1978 denominato USLE (*Universal Soil Loss Equation*), e adottato dal U.S. Department of Agriculture. Si tratta di un modello parametrico su base empirica che fornisce una stima della perdita annua di suolo su un versante causata dall'erosione idrica laminare e dal ruscellamento. Tale modello è stato negli anni modificato dando origine alla cosiddetta *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) che si basa sugli stessi principi empirici della USLE, ma introduce alcuni nuovi parametri che permettono un migliore adattamento del modello anche su terreni morfologicamente complessi.

L'equazione del modello USLE è la seguente:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

In cui:

- E: perdita media annua di suolo per unità di superficie;
- R: fattore di erosività di pioggia e deflusso, tiene conto dell'aggressività degli eventi meteorici;
- K: fattore di erodibilità del suolo, esprime l'erodibilità del suolo dovuta alle proprietà fisico-chimiche dello stesso;
- L: fattore di lunghezza del versante, esprime l'effetto della lunghezza del pendio sulla quantità di materiale eroso;
- S: fattore pendenza del versante, esprime l'effetto della pendenza del versante sulla quantità di materiale eroso;

- C: fattore di copertura vegetale e di uso del suolo, tiene conto del tipo di vegetazione (o coltura) esistente e del tipo di interventi eseguiti su di essa.
- P: fattore tecniche sistematorie e di conservazione del suolo, considera le eventuali azioni messe in atto per contrastare l'erosione.

Nel modello USLE tutti i fattori esposti sono stati calcolati empiricamente su un pendio sperimentale lungo 22.13m e inclinato di 5° e su di esso sono state ricavate le relazioni interpolanti per i fattori di interesse.

La principale innovazione presentata dal modello RUSLE è quella di aver incorporato i fattori L e S in un unico fattore, il fattore topografico, denominato LS, che prende in considerazione la convergenza dei flussi. L'equazione del modello RUSLE è la seguente:

$$E = R \cdot K \cdot (LS) \cdot C \cdot P$$

Il fattore topografico LS è un coefficiente adimensionale che deve essere opportunamente calcolato.

Il modello proposto è detto "a distacco limitato", in quanto assume che il flusso idrico possa trasportare un'infinita quantità di sedimenti, e che la quantità di suolo eroso sia limitata solo dalla capacità dell'acqua di distaccare il suolo.

La stima ottenuta con l'applicazione del modello RUSLE della perdita media annua di suolo fornisce dunque indicazioni sul quantitativo di materiale che viene complessivamente movimentato su tutta la superficie del bacino.

Per la valutazione della produzione di sedimenti, unitamente all'applicazione del modello per la stima del materiale eroso è stato necessario introdurre il coefficiente di resa solida (SDR - **Sediment Delivery Ratio**) capace di tenere in considerazione anche i fenomeni di deposito che avvengono lungo il percorso idraulico.

La USLE è stata originariamente sviluppata nelle unità di misura inglesi, e la conversione dei vari fattori al sistema internazionale avviene a mezzo di appropriati coefficienti moltiplicativi. Particolare attenzione viene data dunque alle unità di misura ed ai coefficienti di conversione, per i quali in Appendice 2 è riportata una tabella riassuntiva.

2.1 Fattore di erosività di pioggia e deflusso

Il fattore di erosività di pioggia e deflusso R rappresenta una misura della forza erosiva della pioggia e del deflusso superficiale. E' influenzato da intensità e durata delle precipitazioni, ovvero dall'energia cinetica della pioggia che può trasformarsi in energia meccanica all'impatto con la superficie.

In generale il fattore R viene definito come il prodotto dell'energia cinetica totale dell'evento meteorico in esame (E) per l'intensità massima di durata 30 minuti (I₃₀) che si è verificata durante lo stesso:

$$R = E \cdot I_{30}$$

Se il parametro E è espresso in $\frac{\text{hundreds} \cdot \text{ft} \cdot \text{tonf}}{\text{acre}}$ ed il parametro I₃₀ in $\frac{\text{inch}}{\text{hour}}$,

il fattore R così calcolato è espresso in $\frac{\text{hundreds} \cdot \text{ft} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch}}{\text{acre} \cdot \text{hour}}$.

L'energia dell'evento, funzione della quantità di pioggia e della distribuzione delle intensità I, è ottenuta sommando i valori dell'energia relativa a ciascun intervallo ad intensità di precipitazione costante, espressi mediante la seguente:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 916 + 331 \cdot \log_{10}(I) && \text{per } I \leq 3 \frac{\text{inch}}{h} \\ \varepsilon &= 1074 && \text{per } I > 3 \frac{\text{inch}}{h} \end{aligned}$$

in cui ε è l'energia cinetica espressa in $\frac{ft \cdot tonf}{acre \cdot inch}$ e I è l'intensità espressa in $\frac{inch}{hour}$.

Le precedenti formule, espresse nell'unità di misura US customary, nel sistema internazionale diventano:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0.119 + 0.0873 \cdot \log_{10}(I) && \text{per } I \leq 76 \frac{mm}{h} \\ \varepsilon &= 0.283 && \text{per } I > 76 \frac{mm}{h} \end{aligned}$$

in cui ε è espressa in $\frac{MJ}{ha \cdot mm}$ e l'intensità I in $\frac{mm}{h}$.

La somma dei prodotti estesa a tutti gli eventi erosivi verificatisi in un anno determina il valore dell'indice annuo. La media dei valori annui estesa ad un periodo pluriennale costituisce il valore del fattore R .

$$R = \frac{\sum_{i=1}^j (EI_{30})_i}{N}$$

in cui $(EI_{30})_i = EI_{30}$ per l'evento meteorico i -esimo, e j indica il numero di eventi meteorici nel periodo di N anni analizzato. L'unità di misura di R è $\frac{hundreds \cdot foot \cdot tonf \cdot inch}{acre \cdot hour \cdot year}$.

Negli USA sono state sviluppate varie equazioni empiriche per la stima di R in funzione della precipitazione. Tali equazioni hanno la seguente forma generale:

$$R = aP^b$$

Nella quale P rappresenta l'altezza di precipitazione di assegnata durata e tempo di ritorno, e a e b sono dei parametri empirici. Questo approccio

sottintende dunque una elevata disponibilità di dati pluviometrici per effettuare la caratterizzazione pluviometrica dell'area in esame in termini di curve di possibilità pluviometrica.

Essendo note le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica per molte stazioni pluviometriche ricadenti nell'area in esame, nel presente studio si fa riferimento alla relazione di Wischmeier e Smith (1978) che grazie a 22 anni di dati, hanno proposto la seguente formula:

$$R = 27.38P^{2.17}$$

nella quale P è la precipitazione misurata in pollici, di durata 6 ore e con tempo di ritorno di 2 anni.

L'analisi statistica delle precipitazioni, condotta utilizzando il modello probabilistico TCEV messo a punto dal CNR-GNDCI, conduce alla determinazione delle curve di possibilità pluviometrica.

I valori del fattore di erosività di pioggia e deflusso espressi nell'unità di misura US customary vengono convertiti in quelli corrispondenti alle unità di misura del sistema internazionale attraverso il coefficiente moltiplicativo di conversione 17,02. Analogamente è possibile calcolarli direttamente nell'unità di misura del sistema internazionale mediante la seguente:

$$R = 0.417P^{2.17}$$

nella quale P è la precipitazione misurata in millimetri, di durata 6 ore e con tempo di ritorno di 2 anni. L'unità di misura di R è $\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h \cdot y}$.

Per maggiori dettagli sulle unità di misura ed i coefficienti moltiplicativi utilizzati per il passaggio tra il sistema US customary units e internazionale si veda l'Appendice 2: "Conversione delle unità di misura".

2.2 Fattore di erodibilità

Il fattore di erodibilità del suolo K esprime l'attitudine intrinseca del suolo ad essere eroso; è definito come il tasso d'erosione per unità dell'indice R relativo ad un segmento di versante con morfologia uniforme pari a 22.13m di lunghezza e con il 9% di pendenza il quale sia libero di vegetazione e lavorato a ritocchino come per la preparazione del letto di semina, per il quale i fattori L, S, C e P assumono valore unitario. La condizione così definita (condizione standard di riferimento) è ritenuta la più critica nei confronti dell'erosione idrica superficiale.

Tale fattore dipende da specifiche proprietà fisiche del suolo influenzanti la capacità di infiltrazione delle precipitazioni e il movimento dell'acqua all'interno del suolo, nonché da proprietà che intervengono sulla dispersione, l'abrasione, la mobilità degli aggregati e delle particelle costituenti il suolo da parte delle precipitazioni e del ruscellamento superficiale.

Il fattore k nell'unità di misura US customary è espresso in *ton acre hour/hundreds of acre foot tonf inch* e nel sistema internazionale è espresso in *t ha h / ha MJ mm*. Il passaggio tra le due unità di misura si effettua moltiplicando il valore di k espresso nell'unità di misura US customary per il coefficiente 0.1317. Per maggiori dettagli sulle unità di misura ed i coefficienti moltiplicativi utilizzati per il passaggio tra un sistema e l'altro si veda l'Appendice 2: Conversione delle unità di misura.

2.3 Fattore di copertura vegetale e di uso del suolo

Il fattore di copertura vegetale e di uso del suolo C prende in considerazione il tipo di vegetazione o di coltura esistente e il tipo di interventi eseguiti su di essa come rapporto rispetto alle condizioni standard, nelle quali assume valore unitario.

E' un numero puro (frazione di unità o percentuale) che esprime principalmente l'effetto di protezione del suolo derivante dalla intercettazione delle piogge e dalla propensione del terreno al ruscellamento; è quindi strettamente collegato al tipo ed allo stato di sviluppo della vegetazione, alla biomassa del terreno, alle modalità di lavorazioni attuali ed agli effetti residui di precedenti lavorazioni.

Fattori di C prossimi a zero hanno come effetto un contenimento del tasso potenziale di erosione del suolo e vengono quindi attribuiti ad aree non erodibili, impermeabilizzate o coperte da affioramenti rocciosi coerenti, oppure ad aree con fitta vegetazione arbustiva.

Valori di C prossimi a uno, al contrario, vengono assegnati a colture scarsamente protettive per copertura vegetale o che subiscono lavorazioni agricole meccaniche che possono favorire il fenomeno erosivo.

2.4 Fattore di tecniche sistematorie e conservazione del suolo

Il fattore di tecniche sistematorie e di conservazione del suolo P è un numero puro che introduce l'effetto di alcune pratiche conservative rispetto alle condizioni standard, caratterizzate da $P=1$.

Il fattore P fa riferimento ad eventuali pratiche di contenimento dell'erosione, volte essenzialmente ad arginare il deflusso superficiale (es. terrazzamenti, ciglionamenti, lavorazioni del terreno).

Nel presente studio tale fattore è stato posto pari ad 1.

2.5 Fattore topografico

Il fattore topografico LS esprime l'effetto della lunghezza (L) e della pendenza (S) del versante sulla quantità di materiale eroso. Serve per aggiustare le perdite di suolo che avvengono per condizioni diverse da quelle standard per le quali il fattore LS è unitario.

Nella USLE la valutazione di L si effettua tramite l'equazione:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m$$

in cui λ [m] rappresenta la distanza orizzontale media dal punto di origine del deflusso al punto in cui la pendenza decresce e inizia l'attività di deposizione, 22,13 rappresenta la lunghezza in metri della parcella standard ed m è un esponente che nel modello USLE assume valori in accordo alla seguente tabella:

Tabella 1 – Valori dell'esponente m per la valutazione del fattore L nella USLE

m	Pendenza %
0.2	<1
0.3	1-3
0.4	3.5-4.5
0.5	>=5

Il fattore pendenza del versante S è calcolato invece con le seguenti relazioni:

$$\begin{array}{ll}
 S = 10.8 \cdot \sin(\theta) + 0.03 & \text{per pendenze } < 9\%, \lambda > 15\text{ft (4.6 m)} \\
 S = 16.8 \cdot \sin(\theta) - 0.50 & \text{per pendenze } \geq 9\%, \lambda > 15\text{ft (4.6 m)} \\
 S = 3 \cdot \sin(\theta)^{0.8} + 0.56 & \text{per } \lambda < 15\text{ft (4.6 m)}
 \end{array}$$

dove λ è la lunghezza del pendio e θ è la pendenza.

Successivamente è stata definita una forma più semplice, ma più accurata della precedente, per il calcolo del fattore LS in un punto del pendio. Tale metodo, che si basa sul concetto dell' "unit contributing area" prende il nome di RUSLE3d:

$$LS = (m + 1) \left(\frac{A(r)}{a_0} \right)^m \left(\frac{\sin(\beta)}{\sin(\beta_0)} \right)^n$$

$$a_0 = 22.13m$$

$$\beta_0 = 5.14^\circ$$

$$\sin(\beta_0) = 0.0896$$

dove $A(r)$ è l' area contribuente di monte, cioè l'area complessivamente drenata a monte, β è l'angolo del pendio, a_0 e β_0 sono rispettivamente la lunghezza (72.6 ft = 22.13 m) e l' angolo della parcella di terreno standard usata per tarare la USLE.

Gli esponenti m e n sono solitamente definiti nei seguenti range di valori:

$$m = 0.1 \div 0.6$$

$$n = 1 \div 1.4$$

e riflettono le interazioni tra i differenti tipi di flusso e le relative forme di erosione.

Nel modello RUSLE, contrariamente a quanto avviene nell'USLE, i valori dell'esponente m variano con continuità al variare della pendenza dei versanti in accordo alla relazione:

$$m = \frac{\beta}{(1 + \beta)}$$

in cui β rappresenta il rapporto tra il tipo di erosione *rill*, causata dal flusso, ed *interrill*, principalmente causata dall'impatto della precipitazione col suolo.

I valori per il rateo β di erosione *rill/interrill* per condizioni nelle quali il suolo è moderatamente suscettibile ad entrambe le tipologie di erosione vengono calcolati mediante la seguente formula:

$$\beta = \frac{\left(\frac{\sin(\theta)}{0.0896} \right)}{\left[3 \cdot (\sin(\theta)^{0.8}) + 0.56 \right]}$$

in cui θ è la pendenza del terreno.

Quando la natura delle precipitazioni, della geologia, della litologia e dell'uso indicano che un suolo è molto suscettibile alla erosione di tipo *rill*, allora il valore dell'esponente m deve essere opportunamente aumentato. L'aumento del parametro m lo si ottiene raddoppiando il valore del parametro β precedentemente citato.

Qualora invece le condizioni favoriscano meno l'erosione di tipo *rill* rispetto a quella di tipo *interrill*, il valore dell'esponente m deve essere opportunamente diminuito. La diminuzione del parametro viene effettuata dimezzando il valore del parametro β .

3. I DATI IN INGRESSO AL MODELLO

La base di dati del modello si compone di due tipi di dato: puntuale e distribuito. Di seguito si descrivono le caratteristiche delle varie tipologie di dato utilizzato dal modello.

3.1 I dati puntuali

I dati puntuali in ingresso al modello sono i valori dell'altezza di precipitazione di assegnata durata e tempo di ritorno disponibili per le stazioni all'interno del bacini analizzati, o nelle loro immediate vicinanze, tali da poter contribuire

significativamente alla determinazione del fattore di erosività di pioggia e deflusso.

Le stazioni pluviometriche utilizzate sono 643, di cui 38 non appartengono al compartimento del S.I.M.I di Pisa.

Nella figura 1 è rappresentata la distribuzione spaziale delle stazioni pluviometriche utilizzate.



Figura 1: Distribuzione dei pluviometri utilizzati. Accanto all'indicatore del pluviometro è riportato il codice dello strumento di misura.

3.2 I dati distribuiti

Il territorio in esame è caratterizzato da una serie di mappe digitali (*i raster*) che contengono i valori, assegnati cella per cella, delle diverse proprietà morfologiche, geolitologiche e idrologiche utilizzate dal modello per la stima della perdita annua di suolo causata dall'erosione idrica laminare e dal ruscellamento.

La risoluzione delle mappe raster adottata è di 100m, ritenendo questa dimensione adatta agli scopi prefissati.

I dati di tipo distribuito in ingresso al modello sono:

- **Modello digitale del terreno (DTM: Digital Terrain Model):** ossia la rappresentazione distribuita delle quote dell'area di analisi.
- **Dati geolitologici e/o pedologici:** rappresentazione distribuita delle informazioni cartografiche riguardanti geolitologia e/o pedologia. Si fa riferimento ad una suddivisione in classi che può corrispondere, nel caso della litologia, alle formazioni affioranti; nel caso della pedologia, alle classi di tipo del suolo, o della sua tessitura (composizione in percentuale di limo sabbia e argilla).
- **Dati di uso del suolo:** rappresentazione distribuita delle informazioni relative all'uso del suolo.

Da tali informazioni sono state derivate le mappe necessarie alla implementazione del modello.

Le precedenti mappe sono riportate nell'Appendice 3 della presente relazione.

4. I DATI DERIVATI

I dati di input sono stati elaborati allo scopo di ottenere le mappe necessarie per l'applicazione del modello RUSLE. Particolarmente impegnativa è l'elaborazione del modello digitale del terreno che conduce al calcolo del fattore topografico.

4.1 Elaborazione della mappa delle quote

Per l'applicazione del modello RUSLE è necessaria la conoscenza della struttura di drenaggio del bacino che relativamente al presente studio è deducibile, mediante opportune procedure, dalle informazioni contenute nel modello digitale del terreno (DTM, *Digital Terrain Model*).

E' necessaria una preventiva verifica del modello digitale del terreno allo scopo di colmare quelle celle che si trovano in depressione e che non consentono un calcolo corretto della mappa dei puntatori e delle mappe da essa derivate. Le celle in depressione, ad eccezione di quelle che si trovano sul bordo della mappa, vengono elevate di quota simulando il riempimento di un invaso finché il livello non consente lo svaso verso le celle di valle.

Le mappe ricavate dal modello corretto delle quote sono le seguenti:

Mappa dei puntatori idrologici

L'estrazione del reticolo idrografico dal modello digitale delle quote (DEM), e dunque la caratterizzazione della struttura di drenaggio, prevede l'individuazione delle direzioni del deflusso secondo percorsi indicizzati dal gradiente topografico. Ciò avviene mediante l'elaborazione di una matrice di puntatori. Tale mappa, a seguito del confronto tra la quota della cella in esame

e quelle delle otto celle circostanti, specifica in quale cella contigua viene trasferita l'acqua in uscita dalla cella esaminata. A seconda della direzione individuata viene assegnato alla cella una direzione in accordo alla figura seguente:

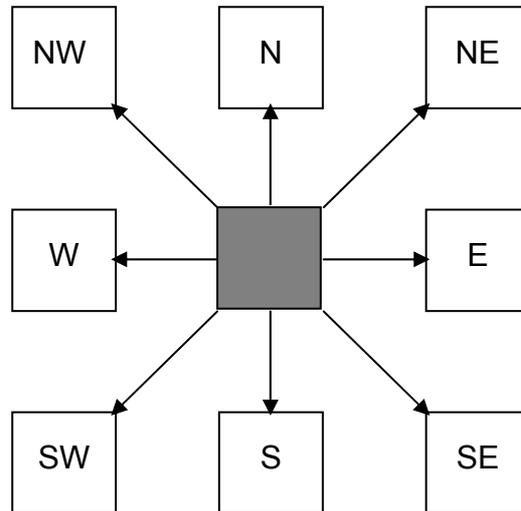


Figura 2 – Direzioni che indicano in quale cella contigua viene trasferita l'acqua in uscita dalla cella esaminata

Mappa della flow accumulation

Successivamente all'individuazione della matrice dei puntatori è stata calcolata la mappa della flow accumulation, che indica per ogni cella il valore dell'area drenata.

Mappa delle celle di versante

Il modello utilizzato fornisce una stima della perdita annua di suolo su un versante causata dall'erosione idrica laminare e dal ruscellamento; è stato dunque necessario distinguere tra i due principali elementi drenanti del sistema, versanti e canali.

Per effettuare la distinzione tra queste due componenti è necessaria una procedura capace di filtrare la mappa della *flow accumulation*, ottenuta

dall'elaborazione della mappa dei puntatori, mediante l'individuazione del cosiddetto deflusso canalizzato.

Il filtro che è stato utilizzato è basato sul concetto che una cella di versante diventa di canale nel momento in cui drena un'area superiore ad un particolare valore di soglia $A_{th} = \text{cost}$.

La scelta dell'area di soglia è stata effettuata mediante un'analisi comparativa visuale con il reticolo idrografico in scala 1:25000.

Il valore che consente la migliore distinzione tra celle canale e celle versante è risultato essere $A_{th} = 50.000 \text{ m}^2 = 5 \text{ ha}$.

Flow accumulation celle di versante

Una volta individuate la mappa della flow accumulation e quella delle celle di versante, è stato possibile ricavare la mappa della flow accumulation relativa alle sole celle di versante.

Mappa delle pendenze dei versanti

Tale mappa, originata direttamente dal DTM, rappresenta la pendenza di ogni cella di versante.

Mappa LS-factor

Una volta calcolate la mappa delle pendenze e dell'area drenata da ogni cella è possibile determinare il fattore topografico mediante la seguente formula:

$$LS = (m + 1) \left(\frac{A(r)}{a_0} \right)^m \left(\frac{\sin(\beta)}{\sin(\beta_0)} \right)^n$$

$$a_0 = 22.13m$$

$$\beta_0 = 5.14^\circ$$

$$\sin(\beta_0) = 0.0896$$

Nell'applicazione della precedente formula si assume che l'erosione di tipo *rill* sia meno favorita rispetto a quella di tipo *interrill*, il che si traduce nell'utilizzare come valore dell'esponente m quello calcolato mediante il parametro β dimezzato.

Per maggiori dettagli circa il calcolo della mappa si rimanda al capitolo 2.5.

4.2 Elaborazione della mappa della geolitologia

L'informazione contenuta nella mappa geolitologica è stata analizzata allo scopo di ottenere la mappa dei k-factor. In Tabella 2 sono riportate le formazioni geolitologiche ed il valore del fattore k ad esse associato. Tale grandezza è espressa in $\frac{\text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{hour}}{\text{hundreds of acre} \cdot \text{foot} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch}}$.

Per maggiori dettagli sulle unità di misura ed i coefficienti moltiplicativi utilizzati per il passaggio tra il sistema US customary e internazionale si veda l'Appendice 2: Conversione delle unità di misura.

Tabella 2 – Valori del fattore di erodibilità del suolo associati alle formazioni geolitologiche

Class e	Descrizione	k fact (USunity)
1	Sabbie di spiaggia e dune costiere recenti + Laguna di Orbetello (Gr)	0.650
2	Depositi alluvionali, di colmata e palustri, terreni torbosi	0.600
3	Travertini, calcari detritico-organogeni	0.500
4	Depositi fluviali, lacustri e marini, terrazzati	0.590
5	Conglomerati poligenici con intercalazioni di sabbie ed argille, brecce sedimentarie poligeniche	0.400
6	Depositi argillosi di origine fluvio-lacustre o marina, con intercalazioni di argille, ghiaie ed altri materiali	0.640

Class e	Descrizione	k fact (USunity)
7	Depositi sabbiosi di origine fluvio-lacustre o marina, con intercalazioni di argille, ghiaie ed altri materiali arenarie poco cementate, "panchina", dune antiche, molasse	0.650
8	Marne, argilliti, argilloscisti	0.650
9	Arenarie quarzo-feldspatiche, spesso turbiditiche, con intercalazioni di marne ed argilliti	0.020
10	Scilti siltosi, marne, argilliti ed arenarie spesso turbiditiche	0.300
11	Alternanze di calcari, calcareniti, calcari marnosi e marne spesso gradate, brecciole calcaree	0.110
12	Calcari massicci o grossolanamente stratificati con rare intercalazioni	0.135
13	Calcari ben stratificati con intercalazioni, calcari litografici, calcari selciferi, subordinatamente calcareniti, calcari marnosi	0.020
14	Calcari stratificati nodulari, calcari marnosi con intercalazioni marnose	0.125
15	Calcari cavernosi, anidriti, dolomie e calcari dolomitici	0.340
16	Diaspri, radiolariti e scisti silicei	0.550
17	Scisti metamorfici, filladi, anageniti	0.230
18	Rocce ignee intrusive acide, graniti, granodioriti, quarzomonzoniti, apliti, rocce filoniane	0.010
19	Rocce ignee effusive acide	0.220
20	Rocce ofiolitiche	0.350
21	Gessi, anidriti con intercalate argille, marne, sabbie (formazione Gessoso-sofifera)	0.300
22	Complesso caotico + Complesso indifferenziato	0.600

4.3 Elaborazione della mappa dell'uso del suolo

L'informazione contenuta nella mappa dell'uso del suolo è stata analizzata allo scopo di ottenere la mappa dei c-factor. Nella Tabella 3 sono riportate le classi di uso del suolo utilizzate ed il valore del fattore c (adimensionale) ad esse associato.

Tabella 3 – Valori del fattore di copertura vegetale e di uso del suolo associati alle classi di uso del suolo

classe	Descrizione	c fact [-]
1	Aree residenziali	0.001
2	Aree commerciali e servizi	0.001
3	Aree industriali	0.001
4	Trasporti, comunicazioni	0.003
5	Verde pubblico, giardini, parchi	0.002
6	Colture erbacee	0.060
7	Colture orto-floro-vivaistiche e frutteti in genere	0.030
8	Allevamenti zootecnici specializzati - Impianti agro industriali	0.002
9	Pertinenze agricole	0.073
10	Praterie, pascoli, incolti erbacei	0.005
11	Praterie, pascoli, incolti con alberi, arbusti e cespugli sparsi	0.003
12	Soprassuoli boschivi	0.002
13	Boschetti	0.004
14	Formazioni vegetali lineari	0.035
15	Rimboschimento	0.010
16	Aree boschive transitoriamente prive di vegetazione	0.020
17	Castagneti da frutto	0.002
18	Cespugliati arbusteti macchia mediterranea	0.020
19	Corsi d'acqua	0.000
20	Laghi, bacini artificiali	0.000
21	Baie, estuari, lagune	0.000
22	Aree paludose con vegetazione arborea ed arbustiva	0.040

classe	Descrizione	c fact [-]
23	Aree paludose con vegetazione erbacea	0.045
24	Spiagge, dune costiere, litorali salati, scogliere marine	0.065
25	Affioramenti rocciosi, calanchi, aree denudate per erosione	0.067
26	Aree estrattive, cave, miniere, discariche	0.068

4.4 Elaborazione dei dati puntuali di precipitazione

4.4.1 Stima dell'altezza di precipitazione per assegnata durata e tempo di ritorno

L'altezza di precipitazione di assegnata durata e tempo di ritorno è stata calcolata mediante la relazione:

$$h_{(T_r,d)} = a \cdot T_r^m \cdot d^n$$

in cui:

T_r = tempo di ritorno [*anni*]

d = durata [*ore*]

h = altezza di precipitazione [*mm*]

a, m, n = parametri relativi a durate superiori all'ora

Il valore di altezza di precipitazione ottenuto, in *mm*, è stato convertito in pollici (1 *pollice* = 2,54 *mm*) prima di essere utilizzato nella formula di Wischmeier e Smith (§ 2.1) per la stima del fattore di erosività di pioggia e deflusso.

L'analisi statistica delle precipitazioni, condotta utilizzando il modello probabilistico TCEV messo a punto dal CNR-GNDCI, conduce alla

determinazione dei parametri delle curve di possibilità pluviometrica. In particolare in questo studio sono stati utilizzati quelli relativi a durate superiori all'ora.

Il modello probabilistico adottato rappresenta la distribuzione del massimo valore conseguito, in un determinato intervallo temporale, da una variabile casuale distribuita secondo la miscela di due leggi esponenziali. In tale modo si ipotizza che i massimi annuali della altezza di precipitazione non provengano tutti dalla stessa popolazione ma da due differenti popolazioni legate a diversi fenomeni meteorologici. Maggiori dettagli sulla funzione di distribuzione utilizzata verranno dati in seguito.

4.4.2 La distribuzione di probabilità TCEV

Un modello statistico TCEV (modello di valore estremo a doppia componente) è particolarmente indicato quando si deve operare a scala di bacino per ricavare una funzione di distribuzione valida per una certa area. E' infatti possibile effettuare un'efficace stima dei parametri di tipo regionale ovvero determinare i parametri utilizzando tutti i dati registrati nelle stazioni interne a una data regione, detta omogenea, all'interno della quale si dimostra che tali parametri sono costanti. A tale scopo per la stima dei parametri si adotta uno stimatore ML (massima verosimiglianza) di tipo regionale.

Il modello TCEV assume che i valori registrati durante gli eventi provengano da due distinte popolazioni, la prima detta componente di base, la seconda detta componente straordinaria. La componente straordinaria dà origine a quei valori che si verificano raramente ma con intensità vistosamente superiori rispetto alla media. In presenza di tali valori i coefficienti di asimmetria delle serie storiche risultano elevati il che non consente di applicare con successo modelli del tipo Gumbel. Il modello TCEV e' caratterizzato da 4 parametri, Λ_1 e θ_1 , relativi alla componente di base cioè agli eventi normali e più frequenti, Λ_2 e θ_2 , relativi alla

componente straordinaria, cioè agli eventi più gravosi. I quattro parametri della TCEV hanno un chiaro significato fisico poiché Λ_1 e Λ_2 rappresentano il numero medio annuo di eventi indipendenti superiori ad una soglia delle due componenti, mentre θ_1 e θ_2 esprimono il valore medio degli stessi eventi. La sua funzione di distribuzione ha la seguente espressione:

$$F_x = P[X \leq x] = \exp\left(-\Lambda_1 \exp\left(-\frac{x}{\theta_1}\right) - \Lambda_2 \exp\left(-\frac{x}{\theta_2}\right)\right)$$

$$\theta_2 > \theta_1 > 0; \Lambda_1 > 0; \Lambda_2 > 0; X \geq 0$$

dove:

- $P(X \leq x)$ = probabilità di avere un evento di intensità minore di X;
- X = altezza di pioggia;
- Λ_1 , θ_1 , Λ_2 e θ_2 sono parametri.

Dalla osservazione dei momenti della distribuzione, calcolati in maniera analitica, si ricava che il coefficiente di asimmetria G dipende solo dai parametri Λ^* e θ^* così definiti:

$$\Lambda^* = \Lambda_2 / (\Lambda_1^{(1/\theta^*)})$$

$$\theta^* = \theta_2 / \theta_1.$$

Inoltre si ricava anche che il coefficiente di variazione CV dipende solo dai parametri Λ^* , θ^* e Λ_1 .

Sulla base della stima regionale dei parametri è possibile definire delle zone all'interno delle quali il valore dell'asimmetria G viene assunto come costante e risultano quindi costanti anche i parametri che lo determinano.

I parametri Λ^* e θ^* definiscono in pratica la funzione di distribuzione della variabile regionale $Y = X/\theta_1 - \ln(\Lambda_1)$:

$$F_Y = \exp\left(-\exp(-y) - \Lambda_* \exp\left(-\frac{y}{\theta_*}\right)\right)$$

Analogamente si possono individuare delle regioni in cui tanto il valore dell'asimmetria G quanto quello del coefficiente di variazione CV risultano costanti.

I parametri Λ^* , θ^* e Λ_1 definiscono la funzione di distribuzione della variabile:

$X'' = X/\theta_1$:

$$P(X'') = \exp(-\Lambda_1 \exp(-X'') - \Lambda^* \Lambda_1^{1/\theta^*} \exp(-X''/\theta^*))$$

Il valore atteso della variabile X si esprime:

$$\mu = E[X] = \left[\ln(\Lambda_1) + \gamma_E - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^j \Lambda_*^j}{j!} \Gamma\left(\frac{j}{\theta_*}\right) \right] \theta_1$$

dove $\gamma_E = 0.57722$ è la costante di Eulero.

Il coefficiente di variazione CV_1 della componente di base dipende da Λ_1 secondo la seguente relazione:

$$CV_1 = \frac{0.557}{(\log \Lambda_1 + 0.251)}$$

Si osservi che il rapporto tra μ e θ_1 risulta costante una volta fissati i parametri Λ^* , θ^* e Λ_1 e che pertanto anche la variabile $X'=X/E[X]$ risulta identicamente distribuita in una sottozona omogenea al secondo livello.

La procedura di regionalizzazione si articola secondo due livelli gerarchici:

1. **zone omogenee**: considera le serie storiche delle varie stazioni nel suo insieme (come fosse un'unica grande serie storica) ipotizzando che il coefficiente di asimmetria teorico G_t e quindi i parametri Λ^* e Θ^* siano costanti;
2. **sottozone omogenee**: prevede l'identificazione di zone idrologicamente assimilabili nelle quali si possa ritenere costante anche il coefficiente di variazione teorico C_v e quindi Λ_1 .

Le elaborazioni utilizzate nel presente lavoro sono state condotte relativamente al primo livello e per durate superiori ed inferiori ad 1 ora. I risultati che sono stati utilizzati per il calcolo dell'erosività di pioggia e deflusso sono quelli relativi alle durate superiori all'ora.

4.4.3 Stima dei parametri per durate superiori all'ora

Nella procedura TCEV le stazioni vengono considerate nel loro insieme ossia come se fossero un'unica serie storica. La stima dei parametri della distribuzione è stata condotta in due fasi:

- **I fase**: sono stati calcolati i parametri Λ^* e Θ^* sulle stazioni con serie storiche lunghe almeno 30 osservazioni;
- **II fase**: sono state introdotte anche le stazioni con almeno 10 osservazioni utilizzando Λ^* e Θ^* calcolati nella prima fase.

La verifica dell'adattamento della distribuzione al campione dei dati è stata condotta confrontando l'andamento teorico e campionario della variabile y e l'andamento di G_t e G .

Quando la verifica dell'adattamento nella prima fase non è stata ritenuta soddisfacente (durate di 6, 12, 24h) si è proceduto al calcolo di Λ^* e Θ^* considerando in un unico passaggio tutte le stazioni con almeno 10 osservazioni.

Sono stati infine calcolati i percentili, cioè i valori massimi di pioggia di assegnato tempo di ritorno.

I percentili relativi alle diverse durate sono stati raggruppati stazione per stazione e sottoposti alla regressione multipla lineare per la stima dei parametri a , n , m mediante la seguente espressione:

$$\log(h_{(T_r,t)}) = \log(a) + m \log(T_r) + n \log(t)$$

In tal modo ci si riporta alla stima dei coefficienti di regressione multipla, in cui il ruolo della variabile dipendente è assunto da $\log(h)$, le variabili indipendenti sono $\log(T_r)$ e $\log(t)$ ed i coefficienti da stimare sono $\log(a)$, m e n . La stima è stata effettuata con il metodo dei minimi quadrati, secondo le normali modalità delle regressioni multiple.

4.4.4 Calcolo dell'R-Factor

Il fattore di erosività della pioggia e del deflusso è stato calcolato in corrispondenza di ogni pluviometro mediante la seguente relazione:

$$R = 27.38P^{2.17}$$

nella quale P è la precipitazione misurata in pollici, di durata 6 ore e con tempo di ritorno di 2 anni. Il valore del fattore così calcolato è espresso in $\frac{\text{hundreds} \cdot \text{foot} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch}}{\text{acre} \cdot \text{hour} \cdot \text{year}}$. Per maggiori dettagli sul calcolo dell'R-Factor si veda

il capitolo 2.1.

Nell'Appendice 1 si riporta una tabella contenente le stazioni pluviometriche utilizzate, i valori dei parametri delle LSPP per durate superiori all'ora aggiornati al 2002 calcolati con modello TCEV, l'altezza di precipitazione di assegnata durata (6 ore) e tempo di ritorno (2 anni) ed il valore fattore R di erosività di pioggia e deflusso espresso in $\frac{\text{hundreds of foot} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch}}{\text{acre} \cdot \text{hour} \cdot \text{year}}$.

Nella Figura 3 sono rappresentati i valori dell'R-Factor calcolati in corrispondenza di ciascuna stazione pluviometrica per la quale siano noti i coefficienti delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica per durate superiori all'ora. I valori dell'R-Factor, sono espressi nella stessa unità di misura di quelli riportati nell'Appendice 1.

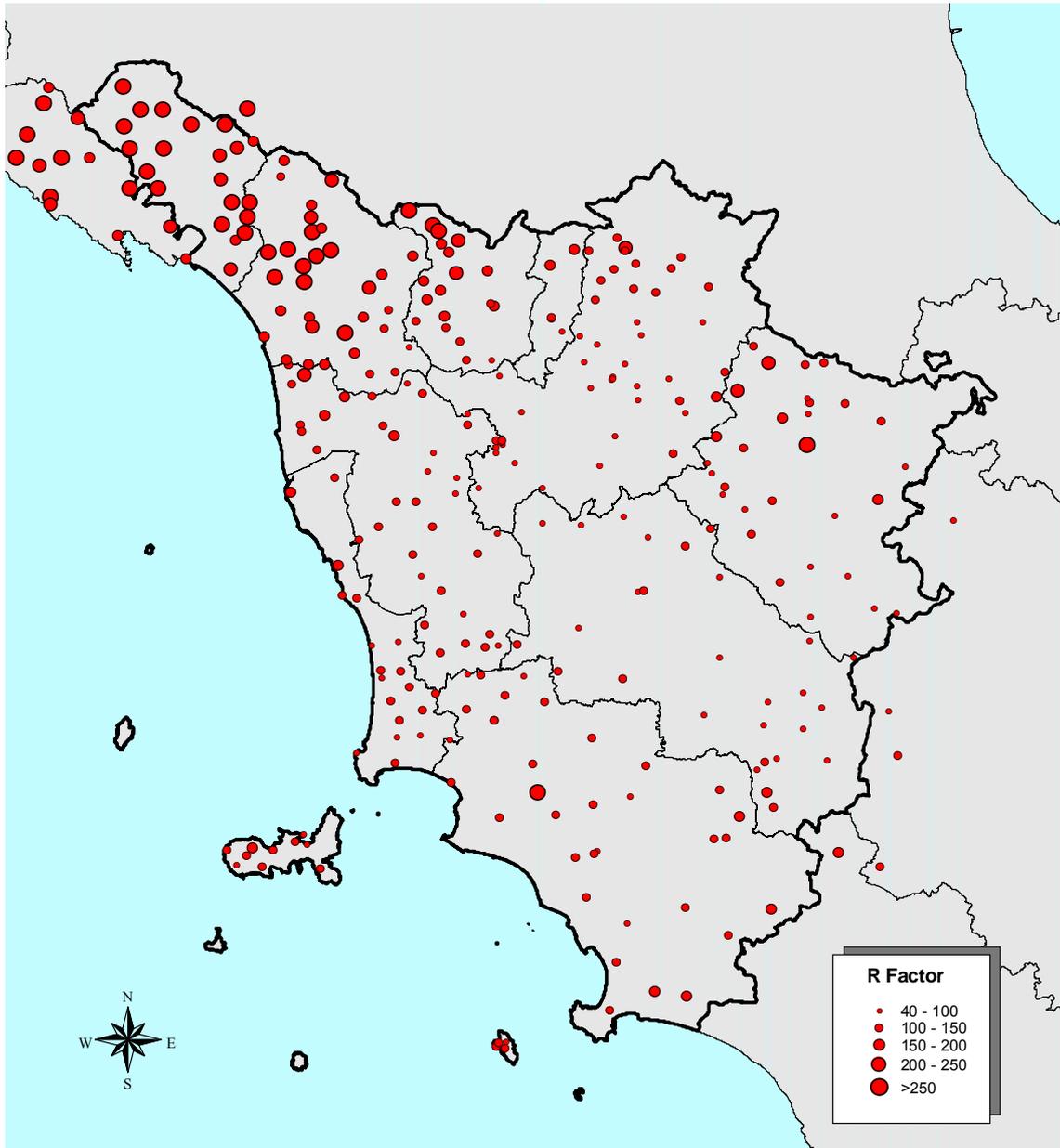


Figura 3: R-Factor espresso calcolato in corrispondenza di ogni pluviometro ed espresso in
(*hundreds of foot tonf inch*) / (*acre hour year*)

I dati ottenuti sono puntuali, associati ad ogni stazione di misura della precipitazione. Per ragguagliarli ed ottenere dunque la mappa dell'R-Factor, è stato utilizzato il metodo dell'inverso della distanza.

4.4.5 Il metodo dell'inverso della distanza

Il metodo dell'inverso della distanza ricostruisce la distribuzione spaziale delle precipitazioni considerando che la precipitazione in un dato punto del bacino sia data dalla media pesata delle piogge di tutte le stazioni utilizzate dove il peso di ciascuna stazione può essere calcolato con la seguente espressione:

$$p_i^{x,y} = \frac{1}{(d_i^{x,y})^\alpha}$$

dove

$p_i^{x,y}$ = peso nel generico punto x, y della stazione i – esima;

$d_i^{x,y}$ = distanza del punto x, y dalla stazione i – esima;

α = esponente.

L'esponente α può essere fissato a priori oppure calcolato ad ogni passo secondo un algoritmo di ottimizzazione. Nel nostro caso è stato utilizzato il valore 2.

5. GENERAZIONE DELLA MAPPA DELL'ERODIBILITÀ

Dopo aver elaborato i dati di input al modello, ed aver ricavato le mappe necessarie alla sua implementazione, è possibile calcolare la perdita media annua di suolo. In particolare, avendo a disposizione dati raster, il calcolo verrà effettuato in ogni cella i,j della griglia con la quale è stato discretizzato il territorio.

$$E(i, j) = R(i, j) \times K(i, j) \times LS(i, j) \times C(i, j) \times P(i, j)$$


Figura 4 – Il modello RUSLE: ad ogni fattore è associato il dato territoriale di origine

In Figura 5 si riporta uno schema che rappresenta in estrema sintesi il flusso delle operazioni effettuate per implementare il modello.

La mappa dell'erodibilità ottenuta è riportata nell'Appendice 3 : "*Dati territoriali a scala di bacino*".

In particolare, in analogia allo schema di flusso rappresentato in Figura 5, nella tavola 1: "*Generazione della mappa dell'erodibilità per il bacino del fiume Elsa*" sono riportati i passaggi e le mappe raster fondamentali per ottenere la mappa dell'erodibilità per il bacino del fiume Elsa.

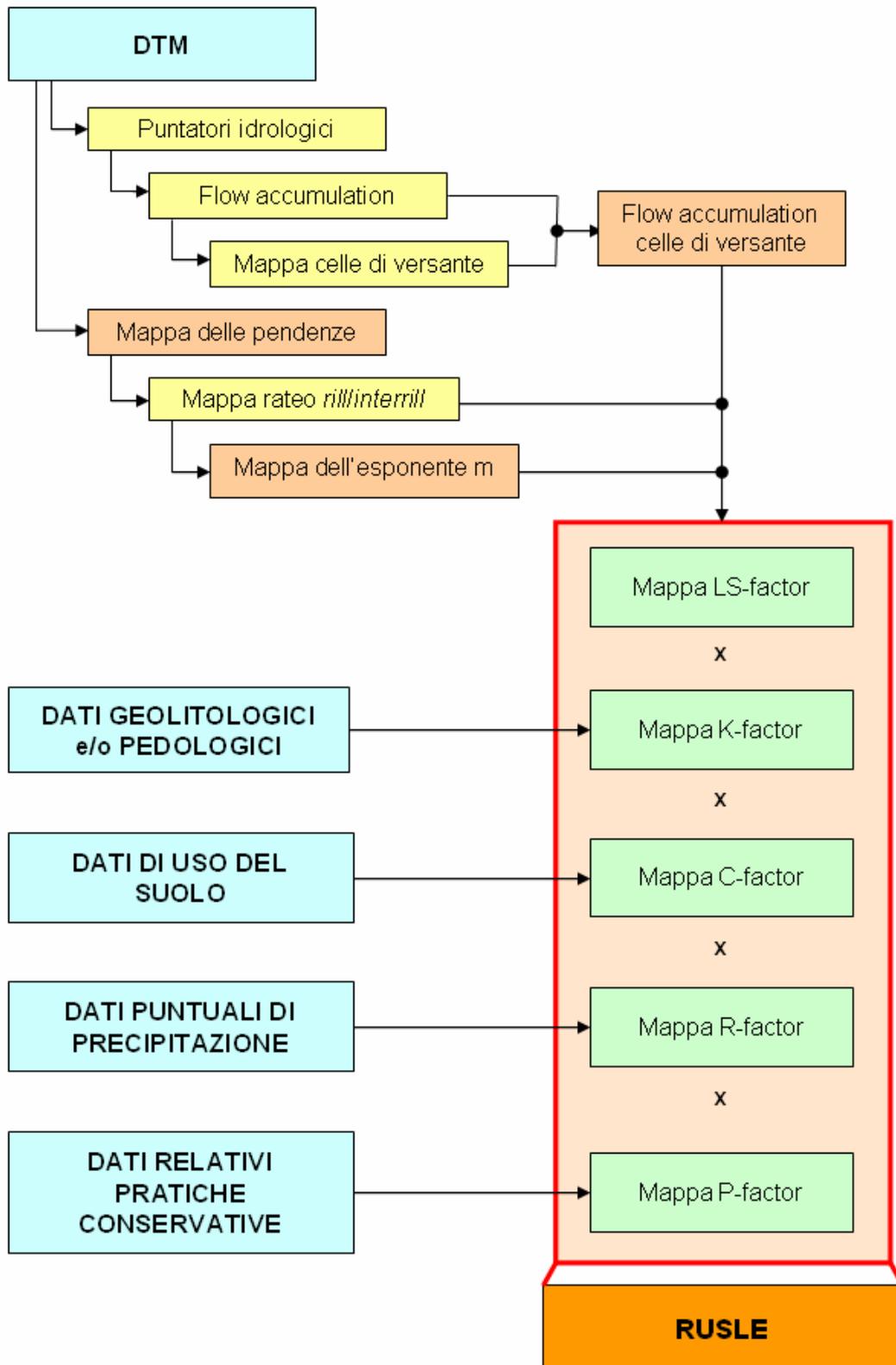


Figura 5 – Schema di flusso per la generazione della mappa dell'erodibilità

6. COEFFICIENTE DI RESA SOLIDA

La stima ottenuta mediante il modello RUSLE della perdita media annua di suolo fornisce indicazioni sul quantitativo di materiale che viene complessivamente movimentato su tutta la superficie del bacino.

La valutazione della produzione di sedimenti nelle aree di studio richiede, unitamente all'applicazione del modello per la stima del materiale eroso, la determinazione del coefficiente di resa solida (SDR - Sediment Delivery Ratio) capace di tenere in considerazione anche i fenomeni di deposito che avvengono lungo il percorso idraulico.

Tale coefficiente, definito come il rapporto tra il trasporto in sospensione rilevato nelle stazioni di misura torbiometriche ed il valore medio dell'erosione, valutato attraverso il modello nel medesimo periodo e sulla medesima area, è un numero adimensionale e può essere formalmente espresso come:

$$SDR = \frac{Y}{E} \cdot 100$$

in cui:

Y = trasporto in sospensione rilevato

E = perdita annua di suolo calcolata

Il valore del SRD stima dunque la percentuale di suolo eroso che abbandona effettivamente il bacino, rispetto a quello complessivamente "movimentato".

Questa stima indica come, potenzialmente, parte del materiale eroso sui versanti non arrivi alla chiusura di bacino, ma sedimenti lungo il percorso a seguito di variazioni di acclività, di scabrosità superficiale, della presenza di vegetazione, delle variazioni di permeabilità del suolo, ecc....

Su scala regionale, uno dei metodi più diffusi per la stima di SDR è quello di utilizzare una relazione empirica del tipo:

$$SDR = \alpha A^\beta$$

in cui A è l'area del bacino in esame e α e β sono parametri empirici che devono essere opportunamente stimati.

Sperimentalmente si è notato che il parametro β assume valori negativi, il che significa che SDR tende a diminuire all'aumentare dell'area.

Risulta inoltre che a parità di area, bacini di differenti regioni siano caratterizzati da valori dei parametri α e β anche molto diversi, essendo il coefficiente di resa solida un parametro fortemente influenzato dalle caratteristiche locali del territorio come ad esempio il regime delle precipitazioni, la topografia, la geologia, la litologia, l'uso e le caratteristiche del suolo.

6.1 Le curve utilizzate in letteratura

In letteratura sono disponibili varie tabelle o formule che riportano i valori del coefficiente di resa solida espressi in funzione dell'area del bacino. In particolare di seguito si riportano quelli maggiormente utilizzati.

→ Roehl (1962) suggerisce di utilizzare valori del SDR in accordo ai dati riportati in tabella 4.

Tabella 4 – Valori del SDR in funzione dell'area proposti da Roehl (1962)

Area [acres]	Area [Kmq]	SDR
6.4	0.03	0.65
320	1.29	0.33
3200	12.95	0.22
64000	259.00	0.10

→ Keith Richards [5], utilizzando gli studi di Roehl (1962), propone il seguente grafico:

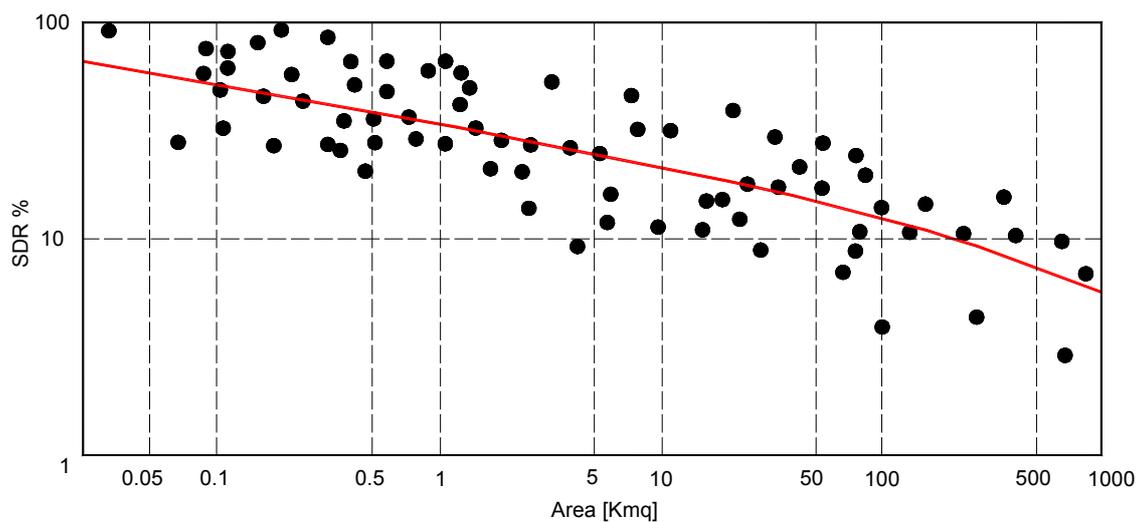


Figura 6 –SDR espresso in funzione dell'area del bacino (Keith Richards, 1982)

→ il Soil Conservation Service (1962) riporta la seguente figura mediante la quale viene fornito un possibile range di valori che possono essere assunti dal SDR in funzione dell'area.

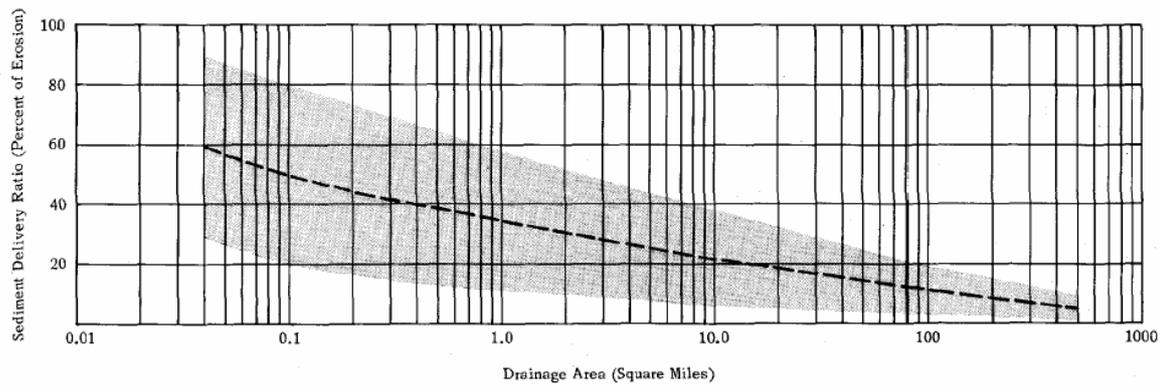


Figura 7 – Range di valori del SDR espresso in funzione dell'area (SCS - *National Engineering Handbook*, 1962)

La linea tratteggiata rappresenta la mediana dei possibili valori assumibili dall'SDR.

→ Renfro (1975), per il Blackland Prairie in Texas ha sviluppato la seguente equazione:

$$\log_{10}(SDR) = 1.8768 - 0.1419 \log_{10}(10A)$$

in cui A rappresenta l'area del bacino drenato in miglia quadrate. L'equazione è valida per $A < 100 \text{ mi}^2$.

La precedente equazione formulata in accordo alle unità di misura adottate dal sistema internazionale diviene:

$$\log_{10}(SDR) = 1.7935 - 0.1419 \log_{10}(A)$$

in cui A è espressa in Km^2 .

→ Vanoni (1975), basandosi sui dati relativi a 300 bacini localizzati in varie parti del mondo, ha sviluppato il seguente modello:

$$SDR = 0.51 \cdot A^{-0.125}$$

in cui A è espressa in miglia quadrate.

→ L'USDA SCS (1979) ha sviluppato un modello basandosi sui dati del Blackland Praire in Texas. La relazione proposta differisce da quella del Vanoni (1975) solo per l'esponente dell'area:

$$SDR = 0.51 \cdot A^{-0.115}$$

in cui A è espressa in miglia quadrate.

→ Boyce (1975) fornisce i valori riportati nella seguente tabella:

Tabella 5 – Valori del SDR in funzione dell'area proposti da Boyce (1975)

A [Kmq]	A [miglia ²]	SDR
1.29	0.5	0.33
2.59	1	0.30
12.95	5	0.22
25.90	10	0.18
129.50	50	0.12
259.00	100	0.10
518.00	200	0.08

6.2 La stima del Sediment Delivery Ratio

Per la stima del SDR sono stati utilizzati i dati di trasporto torbido pubblicati sugli annali del Servizio Idrografico e Mareografico e dati di letteratura provenienti da altri studi.

Nella Tabella 6 sono riportate le stazioni di misura del Servizio Idrografico e Mareografico ed i valori di trasporto solido in sospensione medio annuo. Per ogni stazione vengono indicati anche il bacino di dominio, la stazione idrometrica di riferimento ed il periodo di osservazione.

Tabella 6 – Stazioni torbiometriche del Servizio Idrografico e Mareografico utilizzate per la stima del SDR

Stazione	Bacino di dominio [Kmq]	Idrometro di riferimento	Periodo di osservazione	Trasporto solido in sospensione medio annuo [tonn/Kmq]
Arno a Subbiano	738	Sabbiano (sp.d.)	1958-1972 1974-1996	300
Ombrone a Sasso d'Ombrone	2657	Sasso d'Ombrone (sp.s.)	1953-1983 1985-1990	467
Arno a Nave di Rosano	4083	Nave di Rosano (sp.d.)	1953-1972 1974-1982 1992-1996	247
Arno a San Giovanni alla Vena	8186	S.Giovanni alla Vena (sp.d.)	1936-1942 1954-1985 1995-1996	190
Era a Capannoli	337	Era a Capannoli (sp.d.)	1972-1974 1981-1986 1988-1990 1995-1996	71,9
Orcia a Monte Amiata	580	Monte Amiata (sp.d.)	1926-1940 1953-1976 1979-1981	1050

Nella Tabella 7 sono riportate le sezioni nelle quali in precedenti lavori è stata effettuata una stima del trasporto solido medio annuo in sospensione.

Tabella 7 – Stima del trasporto solido in sospensione in alcune sezioni ricadenti nel territorio in esame

Punto di stima	Bacino di dominio [Kmq]	Trasporto solido [$m^3/anno$]
Serchio a Borgo a Mozzano	1060	100.000
Magra a Calamazza	939	334.000
Vara alla confluenza	580	304.617
Magra alla foce (stazione di San Genesio)	1699	638.000

Per ognuna delle sezioni nella quale è noto il trasporto solido in sospensione (Tabella 6 e Tabella 7), è stato ricavato il coefficiente di resa solida. I risultati sono riportati nel grafico in Figura 8.



Figura 8 – Stima del coefficiente di resa solida effettuata con i dati a disposizione di alcuni bacini ricadenti nel territorio in esame

7. APPENDICE 1: LE STAZIONI PLUVIOMETRICHE

La seguente tabella riporta, per ogni stazione pluviometrica utilizzata per la stima del fattore di erosività e deflusso, le coordinate in UTM, i valori dei parametri delle LSPP per durate superiori all'ora aggiornati al 2002, il valore dell'altezza di precipitazione di assegnata durate e tempo di ritorno, ed il valore del fattore R espresso in $\frac{\text{hundreds of foot} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch}}{\text{acre} \cdot \text{hour} \cdot \text{year}}$.

Le stazioni con codice a 4 cifre non appartengono al compartimento del S.I.M.I di Pisa.

Tabella 8 – Stazioni pluviometriche utilizzate per il calcolo del fattore di erosività di pioggia e deflusso

Codice	Nome	X (UTM)	Y (UTM)	a	n	m	h [mm]	Fact R
							Durata=6 ore TR=2 anni	
10	Marinella	581420	4878115	27.75	0.34	0.21	59.03	170.66
20	Rifugio_Belvedere	589830	4886215	34.65	0.35	0.2	74.52	282.98
35	Fossacava	593140	4882500	30.06	0.35	0.17	63.32	198.72
45	Fondone	595230	4884000	32.11	0.39	0.17	72.66	267.89
60	Massa	591800	4875450	33.28	0.3	0.19	64.99	210.27
80	Retignano	602180	4873470	31.17	0.42	0.2	75.99	295.26
115	Camaiore_I_Frati	603859	4865834	25.24	0.41	0.16	58.79	169.17
119	Massaciuccoli	605420	4853140	27.15	0.27	0.17	49.55	116.73
122	Casa_Rossa	610120	4853140	29.28	0.33	0.16	59.09	171.06
124	Capannone	609100	4850550	35.08	0.25	0.24	64.84	209.24
130	Torre_del_Lago	605120	4854180	29.8	0.29	0.21	57.96	164.01
140	Viareggio	599770	4859630	32.58	0.27	0.2	60.71	181.39
144	Troncolo	606330	4848460	24.82	0.34	0.21	52.79	133.96
160	Capanne_di_Sillano	604499	4901366	25.01	0.41	0.17	58.66	168.35
170	Sillano	603627	4897588	23.79	0.33	0.18	48.68	112.34
178	Orto_di_Donna	595760	4887780	37.79	0.5	0.18	104.87	593.92
200	Villacollemandina	610960	4890750	23.08	0.42	0.19	55.88	151.53
210	Pontecosi	610740	4887690	27.24	0.41	0.2	65.23	211.99

Codice	Nome	X (UTM)	Y (UTM)	a	n	m	h [mm]	
							Durata=6 ore TR=2 anni	Fact R
220	Casone_di_Profecchia	615600	4896590	21.99	0.54	0.17	65.10	211.09
240	Campagrina	600540	4879540	43.86	0.46	0.17	112.51	691.88
250	Isola_Santa	605340	4880165	35.1	0.48	0.17	93.32	461.14
260	Torrite	610940	4884410	28	0.44	0.2	70.75	252.87
270	Castelnuovo_Garfagnana	613275	4885305	28.24	0.35	0.18	59.90	176.16
280	Fornovolasco	608910	4876100	33.77	0.48	0.19	91.04	437.01
290	Polla_dei_Gangheri	611965	4878700	29.7	0.47	0.18	78.10	313.36
300	Galliciano	615380	4880055	29.05	0.44	0.19	72.90	269.81
330	Palagnana	609095	4872500	31.81	0.5	0.17	87.66	402.58
350	Boscolungo	633615	4889150	25.76	0.6	0.17	84.92	375.75
370	Porrino	639275	4885950	26.85	0.48	0.19	72.39	265.70
392	Cutigliano	640580	4884740	23.55	0.6	0.15	76.57	300.13
400	Selva_dei_Porci	645265	4882230	28.53	0.39	0.18	65.01	210.42
410	Sperando	641545	4881480	27.37	0.38	0.18	61.26	184.96
430	S-Marcello_Pistoiese	643335	4879765	24.63	0.42	0.19	59.63	174.48
440	Prunetta	644745	4874430	26.08	0.48	0.17	69.34	242.05
460	Limano	634740	4878700	22.25	0.44	0.19	55.84	151.27
470	Bagni_di_Lucca	627525	4874335	25.09	0.41	0.19	59.67	174.70
480	Borgo_a_Mozzano	624410	4871115	32.75	0.33	0.19	67.48	228.19
490	Vinchiana	623040	4864145	28.99	0.32	0.19	58.67	168.46
495	Gombitelli	610360	4864130	36.02	0.24	0.17	62.30	191.85
496	Valpromaro	611010	4861920	36.61	0.26	0.19	66.54	221.36
500	Mutigliano	618620	4860255	30.63	0.39	0.2	70.77	252.98
510	Lucca	620990	4855580	31.32	0.31	0.19	62.27	191.63
520	Ripafratta	614025	4853160	28.61	0.3	0.19	55.87	151.45
530	Asciano_Pisano	618640	4845430	31.57	0.26	0.21	58.18	165.42
540	Pisa_(Facolta'_Agraria)	614060	4841070	32.29	0.26	0.21	59.51	173.71
550	S-Rossore	608450	4838730	27.22	0.28	0.21	52.00	129.61
570	Vallucciole	714720	4857420	23.04	0.3	0.26	47.23	105.18
580	Stia	718165	4853380	20.05	0.34	0.2	42.35	83.04
581	Stia_automatica	718175	4853390	47.51	0.1	0.27	68.53	235.94
590	Montemignaio	710960	4846530	28.66	0.41	0.23	70.07	247.63
601	Ortignano_auto	721495	4840190	28.71	0.29	0.23	56.62	155.89
610	Camaldoli	727025	4853030	22.64	0.41	0.19	53.84	139.79
621	Badia_Prataglia_auto	731465	4853230	24.27	0.36	0.23	54.26	142.13
625	Pollino	727705	4841290	17.48	0.44	0.2	44.17	90.97

Codice	Nome	X (UTM)	Y (UTM)	a	n	m	h [mm]	
							Durata=6 ore TR=2 anni	Fact R
626	Bibbiena_auto	728060	4844020	27.8	0.29	0.23	54.82	145.36
630	Bibbiena_(Pod_Tripoli)	727420	4844975	16.49	0.42	0.18	39.65	71.96
640	La_Verna	736295	4843695	22.5	0.33	0.21	47.01	104.13
651	Salutio_auto	727155	4833665	41	0.24	0.25	74.95	286.59
660	Citta'_della_Pieve	748750	4760430	24	0.33	0.2	49.80	118.00
670	Villastrada_umbra	746600	4770775	21.2	0.29	0.2	40.95	77.17
680	Chianciano	730805	4771650	22.25	0.26	0.2	40.72	76.27
690	Montepulciano	726520	4774950	22.49	0.24	0.19	39.44	71.14
700	Capezzine	738460	4783570	23.36	0.16	0.19	35.50	56.60
720	Bettolle	728135	4787570	19.6	0.26	0.2	35.87	57.92
730	Foiano_della_Chiana	728375	4793180	18.17	0.27	0.18	33.39	49.57
740	Monte_S-Savino	721130	4801390	28.6	0.21	0.22	48.53	111.58
745	Montanare	748500	4794260	17.55	0.33	0.2	36.41	59.83
750	Cortona	743290	4795170	22.2	0.24	0.18	38.66	68.14
761	Castiglion_Fiorentino_au	737030	4803020	20.25	0.25	0.2	36.41	59.80
762	Fontarronco	728250	4804990	19.43	0.24	0.17	33.61	50.26
770	Arezzo	733980	4817170	23.75	0.25	0.2	42.70	84.51
800	Laterina	719350	4820860	26.42	0.25	0.23	48.50	111.41
811	Badia_Agnano_auto	714370	4812885	30.92	0.19	0.21	50.27	120.44
820	Fattoria_Migliarina	712780	4818825	26.06	0.24	0.2	46.02	99.43
830	Nusenna_in_Chianti	704885	4814160	25.9	0.32	0.26	55.03	146.55
840	Montevarchi_(Le_Coste)	708090	4823860	20.63	0.28	0.2	39.14	69.96
844	Montevarchi_Citta'	707650	4822073	20.08	0.32	0.21	41.21	78.25
845	Montevarchi_auto	708089	4823847	35.15	0.16	0.18	53.04	135.32
850	S-Giovanni_Valdarno	704950	4827320	21.88	0.25	0.18	38.79	68.64
861	Villa_dell'Olio_auto	712480	4833115	27.65	0.27	0.23	52.61	132.92
870	Renacci_(Fattoria)	703885	4829580	21.33	0.3	0.21	42.23	82.53
880	Pian_di_Sco'	706120	4835710	31.75	0.25	0.24	58.69	168.52
891	Il_Palagio_auto	696070	4831975	31.12	0.18	0.2	49.35	115.73
894	Serraglio	698820	4841580	22.34	0.31	0.22	45.35	96.30
900	Vallombrosa	706000	4845450	26.7	0.34	0.21	56.79	156.95
905	Rignano	697410	4844390	23.34	0.32	0.19	47.24	105.24
911	Cavallina_auto	679010	4872890	35.65	0.13	0.19	51.34	126.05
915	Monte_di_Fo'	682700	4883150	23.1	0.4	0.21	54.71	144.74
921	Mangona_auto	676070	4879930	27.09	0.29	0.18	51.60	127.47
925	Marcoiano_auto	684620	4880500	40.52	0.2	0.26	69.43	242.74

Codice	Nome	X (UTM)	Y (UTM)	a	n	m	h [mm]	
							Durata=6 ore TR=2 anni	Fact R
926	Le_Croci_(Barber)_auto	682121	4875458	32.16	0.15	0.18	47.67	107.32
930	Ponte_a_Olmo	684710	4880025	21.94	0.36	0.17	47.05	104.32
951	S-Piero_a_Sieve_auto	686793	4870988	21.59	0.36	0.24	48.60	111.93
961	S-Agata_di_Mugello_auto	687165	4876935	21.19	0.38	0.24	49.44	116.17
970	Vetta_alle_Croci	688380	4860080	22.67	0.33	0.16	45.75	98.18
973	Montesenario	687480	4863060	21.04	0.34	0.19	44.14	90.82
980	Razuolo	697810	4878545	23.08	0.36	0.2	50.53	121.82
990	Ronta	695350	4875830	24.33	0.33	0.24	51.90	129.09
1000	Borgo_S-Lorenzo	691880	4870070	22.14	0.34	0.21	47.09	104.54
1010	Villore	704260	4871330	21.26	0.38	0.21	48.58	111.84
1030	Dicomano	703040	4863050	20.76	0.32	0.18	41.73	80.40
1040	Consuma	708125	4851395	24.72	0.33	0.2	51.29	125.82
1050	Nave_di_Rosano	694960	4849630	21.79	0.33	0.21	45.53	97.14
1070	Fiesole	684500	4853215	23.09	0.26	0.19	41.97	81.42
1080	Firenze_Idrografico	681800	4850085	20.38	0.29	0.19	39.09	69.78
1090	Firenze_Ximeniano	681580	4849500	24.83	0.23	0.19	42.77	84.83
1095	Firenze_Genio_Civ_auto	681729	4849851	25.18	0.24	0.19	44.16	90.91
1100	Bagno_a_Ripoli	687380	4848000	21.75	0.25	0.19	38.83	68.78
1130	Ferrone	682240	4836080	19.5	0.27	0.22	36.84	61.37
1140	Antella	687650	4844535	20.58	0.31	0.23	42.06	81.81
1150	Cantagallo	666955	4876645	24.3	0.43	0.16	58.66	168.39
1170	S-Quirico_di_Vernio	672665	4880340	22.64	0.43	0.19	55.81	151.09
1190	Le_Croci_di_Calenzano	677700	4868315	24	0.32	0.17	47.91	108.49
1200	Calenzano	673970	4859720	19.62	0.33	0.2	40.71	76.20
1210	Prato_Galceti	667277	4864075	30.85	0.21	0.18	50.92	123.83
1215	S-Giusto_auto	676647	4847460	23.8	0.26	0.17	42.66	84.37
1220	Sesto_Fiorentino	678090	4857740	20.48	0.3	0.16	39.17	70.08
1225	Case_Passerini_auto	675121	4853564	17.89	0.34	0.16	36.76	61.06
1230	Prato_in_Toscana	669927	4860839	24.67	0.27	0.19	45.65	97.72
1240	Piteccio	652200	4875300	25.64	0.42	0.18	61.65	187.54
1257	Pistoia_(Frutticoltura)	653937	4866685	33.99	0.22	0.18	57.11	158.87
1260	Pistoia	653080	4867535	21.55	0.39	0.18	49.10	114.46
1276	Olmi	667330	4864245	27.27	0.25	0.18	48.35	110.69
1285	Castellina_in_Chianti	684420	4816940	25.67	0.22	0.19	43.43	87.70
1300	S-Andrea_in_Fabbrica	678625	4828945	20.97	0.26	0.17	37.59	64.11
1350	Empoli_(Prunecchio)	660370	4841740	21.69	0.24	0.22	38.84	68.80

Codice	Nome	X (UTM)	Y (UTM)	a	n	m	h [mm]	
							Durata=6 ore TR=2 anni	Fact R
1362	Empoli	655140	4850200	25.27	0.23	0.2	43.83	89.46
1410	Poggibonsi	674350	4814900	22.39	0.27	0.2	41.72	80.38
1420	S-Gimignano	665190	4815290	22.76	0.25	0.19	40.64	75.90
1430	Certaldo	665165	4823660	22.22	0.23	0.18	38.01	65.67
1450	Castelfiorentino	658870	4829665	22.01	0.27	0.23	41.88	81.02
1458	Prunetta_Bussagna	654490	4833480	20.37	0.25	0.23	37.39	63.36
1460	Rio_Broccolino	655980	4834035	19.58	0.26	0.17	35.10	55.24
1470	S-Chiara	654315	4832290	21.26	0.25	0.2	38.22	66.46
1474	Fontaccia	654320	4834980	25.95	0.26	0.19	47.17	104.90
1476	Meleto_(Fatt-Granaiolo)	655320	4834560	24.19	0.26	0.17	43.36	87.40
1480	Meleto	655675	4834920	23.85	0.35	0.18	50.59	122.09
1490	S-Miniato_(Cimitero)	647740	4838630	26.46	0.29	0.19	50.75	122.96
1500	Fattoria_Scaletta	647595	4841200	22.5	0.29	0.22	44.06	90.49
1530	S-Gervasio	639770	4832070	26.4	0.2	0.19	43.10	86.23
1550	Stiappa	637210	4872730	25.29	0.44	0.17	62.59	193.81
1560	Serra_Pistoiese	641145	4870670	26.36	0.4	0.17	60.73	181.50
1570	Vellano	638190	4868360	25.02	0.39	0.17	56.62	155.89
1580	Pescia	635645	4863315	28.86	0.29	0.19	55.35	148.45
1600	Montecatini_Terne	642475	4861940	25.38	0.31	0.18	50.11	119.60
1610	Marliana	642360	4864570	26.8	0.35	0.18	56.84	157.25
1620	Monsummano	645950	4858415	23.16	0.34	0.21	49.26	115.27
1630	Castelmartini	647370	4854010	24.4	0.31	0.19	48.51	111.47
1640	Spicchio	653350	4854100	23.07	0.3	0.17	44.43	92.13
1660	Volterra	649965	4808235	26.88	0.24	0.21	47.80	107.96
1680	La_Madonnina	654523	4813172	20.59	0.29	0.18	39.22	70.28
1720	Laiatico	639480	4814640	25.01	0.29	0.2	48.30	110.46
1730	Terricciola	635535	4820630	26.96	0.24	0.21	47.94	108.65
1740	Castelfalfi	650325	4823580	20.25	0.28	0.19	38.15	66.19
1750	Ghizzano_di_Peccoli	644720	4822320	22.48	0.27	0.18	41.31	78.68
1760	Legoli	645180	4826160	24.48	0.24	0.21	43.53	88.13
1770	Villa_Saletta_(Fogliano)	638460	4827810	26.72	0.2	0.19	43.62	88.51
1780	Casciana_Terne	630785	4820565	27.08	0.27	0.2	50.46	121.44
1790	S-Giovanni_alla_Vena	627880	4838295	27.28	0.27	0.19	50.48	121.55
1800	Monte_Serra	625190	4845480	22.85	0.4	0.19	53.38	137.18
1820	S-Piero_a_Grado	608600	4837000	27.13	0.26	0.21	50.00	119.05
1830	Coltano	612220	4832785	29.66	0.26	0.2	54.29	142.31

Codice	Nome	X (UTM)	Y (UTM)	a	n	m	h [mm]	
							Durata=6 ore TR=2 anni	Fact R
1840	Pizzorne	629135	4865940	22.46	0.42	0.16	53.26	136.53
1843	Paduli D	590585	4909794	33.53	0.46	0.19	87.21	398.11
1845	Succiso	595845	4913572	28.73	0.48	0.2	77.99	312.39
1850	Segromigno_Monte	628060	4861540	25.91	0.28	0.2	49.15	114.72
1860	Montecarlo	633940	4857235	23.56	0.29	0.17	44.57	92.75
1870	Chiesina_di_Padule	630700	4851300	26.85	0.32	0.2	54.72	144.79
1880	Massa_Macinaia	624580	4850830	25.89	0.34	0.19	54.31	142.45
1890	Orentano	633430	4848365	24.18	0.28	0.18	45.24	95.81
1900	Staffoli	637120	4846115	25.13	0.29	0.19	48.20	109.94
1910	Pontedera	630390	4836045	30.18	0.28	0.2	57.25	159.73
1940	Nugola	616370	4826115	28.12	0.27	0.19	52.04	129.82
1960	Livorno	606140	4822595	34.26	0.23	0.21	59.84	175.79
1990	Casacce	622100	4811390	26.75	0.24	0.18	46.59	102.11
2000	S-Luce	626780	4814720	26.41	0.25	0.19	47.15	104.82
2030	Quercioletta	617270	4805320	27.66	0.32	0.22	57.16	159.16
2050	Vada_(Bonifica)	618325	4798385	26.17	0.25	0.2	47.05	104.32
2060	Cecina_(Terriccio_Basso)	621525	4797500	30.23	0.24	0.2	53.38	137.22
2070	Gerfalco	660930	4779220	24.52	0.28	0.17	45.56	97.29
2080	Anqua	659380	4786580	22.91	0.37	0.2	51.07	124.63
2100	Castelnuovo_V-Cecina	654810	4786510	23.79	0.29	0.2	45.95	99.10
2110	Larderello	652940	4788960	25.43	0.31	0.2	50.91	123.78
2150	Ponteginori	641580	4799364	25.69	0.25	0.21	46.51	101.73
2160	Libbiano	646690	4793890	19.68	0.32	0.2	40.11	73.79
2170	Canneto	641270	4784650	23.37	0.31	0.2	46.78	103.05
2180	Sassa	637500	4791240	21.65	0.36	0.23	48.40	110.92
2200	Mociao	636920	4802980	23.49	0.25	0.22	42.82	85.04
2210	Miemo	634820	4807800	22.79	0.35	0.21	49.35	115.73
2260	Castelluccio	631430	4787190	24.59	0.26	0.21	45.32	96.18
2265	Renaione	625215	4786360	24.04	0.29	0.19	46.11	99.86
2270	Castagneto_Carducci	631870	4780165	27.15	0.23	0.19	46.77	102.97
2278	Donoratico	627280	4780600	26.21	0.29	0.21	50.97	124.13
2280	Porcareccia	627460	4778580	23.71	0.27	0.21	44.49	92.39
2290	S-Carlo_Solvay	629700	4773350	27.82	0.27	0.21	52.20	130.71
2300	Populonia	621505	4760800	23.78	0.28	0.2	45.11	95.23
2320	Gorgo_Leccia	651700	4785970	25.51	0.28	0.2	48.39	110.91
2330	Serrazzano_Paese	647205	4786855	23.04	0.36	0.19	50.10	119.55

Codice	Nome	X (UTM)	Y (UTM)	a	n	m	h [mm]	
							Durata=6 ore TR=2 anni	Fact R
2350	Lago	647565	4779350	23.62	0.26	0.2	43.23	86.82
2370	Monterotondo	650870	4779410	30.13	0.24	0.19	52.84	134.20
2380	Sassetta	633890	4776690	28.69	0.25	0.16	50.17	119.92
2390	Molino_del_Balzone	640295	4775000	27	0.26	0.2	49.42	116.06
2400	S-Costanza	656560	4774465	22.88	0.33	0.2	47.47	106.38
2410	Suvereto	636965	4770945	26.1	0.25	0.2	46.92	103.72
2420	Campiglia_Marittima	631660	4768510	24.37	0.34	0.2	51.48	126.82
2430	Venturina	631200	4764710	27.27	0.22	0.19	46.14	100.00
2434	Casalappi	636500	4765100	27.53	0.22	0.17	45.94	99.05
2440	Vignarca	630720	4758535	23.99	0.3	0.17	46.20	100.29
2460	Follonica	643775	4753770	29.85	0.21	0.21	50.30	120.60
2470	Massa_Marittima_Azienda	653850	4768500	22.81	0.36	0.19	49.60	116.97
2471	Massa_Marittima	653850	4768500	28.88	0.26	0.21	53.23	136.35
2480	Montebamboli	647445	4771210	29.47	0.23	0.18	50.41	121.19
2490	Montioni	643565	4764000	23.29	0.29	0.18	44.36	91.83
2520	Castel_di_Pietra	662950	4758170	27.84	0.31	0.19	55.35	148.41
2530	Roccastrada	676800	4764375	26.19	0.26	0.19	47.60	107.02
2540	Lupo	663810	4751345	36.69	0.3	0.2	72.14	263.78
2560	Tirli	655060	4745530	26.49	0.31	0.21	53.40	137.30
2570	Batignano	677040	4748740	26.51	0.26	0.19	48.19	109.87
2580	Acquisti	668365	4746240	26.27	0.26	0.2	48.08	109.36
2590	Grosseto	672990	4736055	26.44	0.23	0.22	46.50	101.70
2612	Monistero_d'Ombrone	706850	4802800	26.93	0.23	0.16	45.43	96.71
2620	Monte_Oliveto	706775	4783585	23.73	0.24	0.19	41.61	79.93
2640	Vagliagli	689954	4812132	20.09	0.3	0.2	39.50	71.39
2642	Madonna_a_Brolio	698880	4810000	24.9	0.28	0.18	46.59	102.11
2660	Siena_Poggio_al_Vento	687630	4799185	19.96	0.34	0.2	42.16	82.24
2670	Siena_Universita'	688975	4799420	24.07	0.29	0.21	46.81	103.19
2700	Montalcino	703315	4769865	23.52	0.25	0.19	41.99	81.51
2710	Boccheggiano	665700	4773020	21.56	0.38	0.18	48.25	110.21
2720	Chiusdino	668760	4780355	23.83	0.35	0.19	50.89	123.72
2740	Cotorniano_(Fattoria)	673760	4790520	22.02	0.31	0.19	43.78	89.21
2770	Tocchi	684125	4778325	22.32	0.35	0.2	48.00	108.96
2820	Spineta	732160	4759110	18.74	0.38	0.18	41.94	81.30
2830	Campiglia_d'Orcia	717445	4758730	20.8	0.43	0.18	50.92	123.83
2850	Podere_Pianotta	720340	4759530	21.37	0.31	0.19	42.48	83.60

Codice	Nome	X (UTM)	Y (UTM)	a	n	m	h [mm]	
							Durata=6 ore TR=2 anni	Fact R
2860	La_Foce	726585	4766515	25.58	0.19	0.18	40.73	76.30
2870	Spedaletto	717085	4767600	21.69	0.19	0.17	34.30	52.54
2880	Pienza_(Madonnina)	718125	4773085	20.92	0.25	0.18	37.09	62.27
2900	Castel_del_Piano	706920	4752060	23.75	0.31	0.2	47.54	106.72
2910	Vivo_d'Orcia	715630	4757000	15.75	0.48	0.16	41.59	79.81
2919	Paganico_Pian_Colombaio	689550	4757695	25.86	0.27	0.16	46.87	103.46
2930	Campagnatico	685900	4750520	25.1	0.22	0.2	42.76	84.80
2958	Poggio_Cavallo	678240	4737560	25.86	0.23	0.2	44.85	94.05
2960	Ponte_Tura	677355	4737095	23.56	0.31	0.22	47.82	108.08
2970	Alberese_Podere_129	675610	4726770	24.61	0.29	0.21	47.86	108.27
3010	Poggio_Perotto	685065	4720545	22.74	0.28	0.19	42.84	85.13
3020	Roccalbegna	705425	4740395	24.96	0.34	0.18	52.00	129.62
3022	Triana	708480	4740580	26.92	0.28	0.2	51.07	124.64
3060	Pomonte	698875	4724230	26.35	0.27	0.2	49.10	114.45
3080	Manciano	708940	4717840	29.06	0.26	0.19	52.82	134.10
3100	S-Donato	682670	4711235	25.39	0.31	0.22	51.54	127.13
3110	Orbetello	681025	4699970	28.41	0.25	0.21	51.43	126.56
3122	Monte_Alzato	691540	4704300	32.57	0.22	0.22	56.26	153.80
3130	Capalbio	699095	4703200	30.54	0.26	0.21	56.29	153.93
3150	Portoferraio_Citta'	609100	4741410	23.68	0.28	0.22	45.55	97.25
3160	Portoferraio_Orti	607060	4739810	26.05	0.33	0.22	54.81	145.28
3170	Portoferraio_Schiopparel	609865	4739240	24.21	0.26	0.2	44.31	91.60
3180	Procchio	601840	4737880	31.68	0.16	0.21	48.81	112.98
3190	Poggio	596960	4738265	29.52	0.3	0.19	57.64	162.10
3200	Patresi_Mortigliano	591000	4737750	24.07	0.32	0.19	48.72	112.51
3210	Monte_Capanne	595710	4736505	23.9	0.34	0.22	51.19	125.29
3220	Pino	593320	4734250	21.28	0.34	0.18	44.33	91.69
3230	S-Piero_in_Campo	599320	4734080	25.29	0.27	0.21	47.45	106.28
3250	Capoliveri	613100	4733510	29.71	0.22	0.2	50.62	122.26
3270	Giglio_(Castello)	656610	4692450	22.92	0.28	0.2	43.48	87.91
3280	Poggio_Pagana_(Giglio)	656325	4690850	24.96	0.35	0.2	53.68	138.87
3290	Giglio_(Franco)	654475	4691350	24.75	0.28	0.2	46.95	103.86
3300	Campese_(Giglio)	654825	4692190	23.42	0.3	0.22	46.69	102.62
21430	Castiglione_chiavarese	541472	4901893	43.35	0.29	0.18	82.57	353.58
21460	Montale	549523	4892692	40.19	0.25	0.18	71.26	256.81
21470	Levanto	549537	4890841	36.07	0.27	0.2	67.21	226.21

Codice	Nome	X (UTM)	Y (UTM)	a	n	m	h [mm]	
							Durata=6 ore TR=2 anni	Fact R
21520	La spezia	565599	4883575	29.52	0.33	0.18	60.41	179.44
21570	Guinadi	566575	4918763	31.12	0.39	0.18	70.91	254.08
21590	Ss annunziata	570616	4913251	32.4	0.45	0.17	81.64	344.94
21620	Rocca sigillina	575927	4913310	36.02	0.33	0.16	72.69	268.16
21630	Rocchetta	566670	4909506	34.44	0.43	0.17	83.72	364.35
21640	Parana	568056	4903966	39.54	0.36	0.17	84.79	374.50
21660	Villafranca	576034	4904054	40.62	0.37	0.19	89.92	425.40
21670	Iera	582613	4909688	40.67	0.36	0.2	89.05	416.49
21710	Bola tré	572106	4898455	41.05	0.34	0.18	85.52	381.54
21720	Passo_del_cerreto	597283	4906187	29.73	0.34	0.18	61.94	189.44
21730	Matucaso	593321	4904277	32.05	0.34	0.2	67.70	229.80
21750	Aria	589357	4902370	29.19	0.37	0.22	65.97	217.27
21770	Mazzola	589433	4896817	30	0.36	0.17	64.33	205.70
21780	Minuccia	596170	4891357	35.82	0.45	0.17	90.25	428.86
21790	Equi	592173	4891300	34.21	0.38	0.19	77.10	304.67
21830	Novegino	574810	4894782	38.06	0.29	0.2	73.51	274.73
21840	Passo cento croci	549328	4918610	25.02	0.44	0.17	61.92	189.35
21860	Varese ligure	548028	4914897	30.38	0.47	0.18	79.89	329.14
21890	Tavarone	544095	4907464	37.05	0.31	0.18	73.15	271.81
21910	Chiusola	556025	4911258	27.12	0.45	0.15	67.39	227.53
21920	S. margherita	552113	4901969	39.52	0.32	0.2	80.54	334.99
21940	Mattarana	546806	4900077	29.18	0.4	0.19	68.16	233.20
21950	Sero zignano	558764	4902025	28.77	0.34	0.16	59.11	171.19
22010	Piana_battolla	568152	4894710	38.1	0.3	0.19	74.40	282.00
22030	Sarzana	577582	4885557	34.06	0.3	0.18	66.05	217.81
30600	S flora	711356	4745814	29.4	0.3	0.19	57.41	160.68
30630	Pitigliano	718869	4723816	30.96	0.26	0.2	56.67	156.19
31060	Pieve s stefano	744775	4839596	23.86	0.35	0.17	50.26	120.38
31080	Sansepolcro	750565	4828688	26.22	0.23	0.19	45.17	95.47
31110	Toppole	744104	4821036	31.39	0.28	0.18	58.73	168.80
31150	Citta di castello	761835	4816141	22.28	0.27	0.19	41.23	78.33
31800	Abbadia s salvatore	717991	4751580	33.19	0.26	0.2	60.75	181.64
31810	Piancastagneto	719470	4747921	29.04	0.28	0.17	53.96	140.44
31890	Acquapendente	734827	4737309	30.04	0.31	0.21	60.55	180.38
31900	Orvieto	744505	4733938	27.52	0.21	0.21	46.37	101.10

8. APPENDICE 2: CONVERSIONE DELLE UNITÀ DI MISURA

Nella tabella seguente riportate le unità di misura US customary più utilizzate per l'applicazione del modello RUSLE.

Tabella 9 – Dimensioni per le grandezze che intervengono nel calcolo della RUSLE

Fattore	Simbolo	Dimensione	Tipica unità di misure nel sistema US customary
Intensità di precipitazione	I	$\frac{\text{length}}{\text{time}}$	$\frac{\text{inch}}{\text{hour}}$
Energia unitaria di precipitazione	ε	$\frac{\text{length} \cdot \text{force}}{\text{area} \cdot \text{length}}$	$\frac{\text{foot} \cdot \text{tonf}}{\text{acre} \cdot \text{inch}}$
Erosività della pioggia	EI	$\frac{\text{length}^2 \cdot \text{force}}{\text{area} \cdot \text{time}}$	$\frac{\text{hundreds of foot} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch}}{\text{acre} \cdot \text{hour}}$
Perdita annuale di suolo	E	$\frac{\text{mass}}{\text{area} \cdot \text{time}}$	$\frac{\text{ton}}{\text{acre} \cdot \text{year}}$
Fattore di erosività di pioggia e deflusso	R	$\frac{\text{length} \cdot \text{force} \cdot \text{length}}{\text{area} \cdot \text{time} \cdot \text{time}}$	$\frac{\text{hundreds of foot} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch}}{\text{acre} \cdot \text{hour} \cdot \text{year}}$
Fattore di erodibilità del suolo	K	$\frac{\text{mass} \cdot \text{area} \cdot \text{time}}{\text{area} \cdot \text{length}^2 \cdot \text{force}}$	$\frac{\text{ton} \cdot \text{acre} \cdot \text{hour}}{\text{hundreds of acre} \cdot \text{foot} \cdot \text{tonf} \cdot \text{inch}}$
Fattore di lunghezza del versante	L	$\left(\frac{\text{length}}{\text{length}}\right)^m$	

Fattore	Simbolo	Dimensione	Tipica unità di misure nel sistema US customary
Fattore pendenza del versante	S	Adimensionale	
Fattore di copertura vegetale e di uso del suolo	C	Adimensionale	
Fattore tecniche sistematorie e di conservazioni e del suolo	P	Adimensionale	

Nella seguente tabella si sono riportati i fattori di conversione per i parametri di RUSLE dal sistema US customary al sistema SI.

Tabella 10 – Conversione tra le unità di misura

Fattore	Simbolo	Unità di misure nel sistema US customary	Moltiplicato per	Unità di misura nel S.I.
Intensità di precipitazioni	I	$\frac{inch}{hour}$	25.4	$\frac{mm}{h}$

Fattore	Simbolo	Unità di misure nel sistema US customary	Moltiplicato per	Unità di misura nel S.I.
Energia unitaria di precipitazioni	ε	$\frac{foot \cdot tonf}{acre \cdot inch}$	$2.638 \cdot 10^{-4}$	$\frac{MJ}{ha \cdot mm}$
Erosività della pioggia	EI	$\frac{hundreds\ of\ foot \cdot tonf \cdot inch}{acre \cdot hour}$	17.02	$\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h}$
Perdita annuale di suolo	E	$\frac{ton}{acre \cdot year}$	0.2242	$\frac{Kg}{m^2}$
Fattore di erosività di pioggia e deflusso	R	$\frac{hundreds\ of\ foot \cdot tonf \cdot inch}{acre \cdot hour \cdot year}$	17.02	$\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot h \cdot y}$
Fattore di erodibilità del suolo	K	$\frac{ton \cdot acre \cdot hour}{hundreds\ of\ acre \cdot foot \cdot tonf \cdot inch}$	0.1317	$\frac{t \cdot ha \cdot h}{ha \cdot MJ \cdot mm}$

Note:

- Il termine *tonf* indica tonnellate forza, senza questa simbologia indica tonnellate.
- La notazione "hundreds of" indica che il valore numerico deve essere moltiplicato per 100 per ottenere il valore numerico vero nell'unità di misura data.

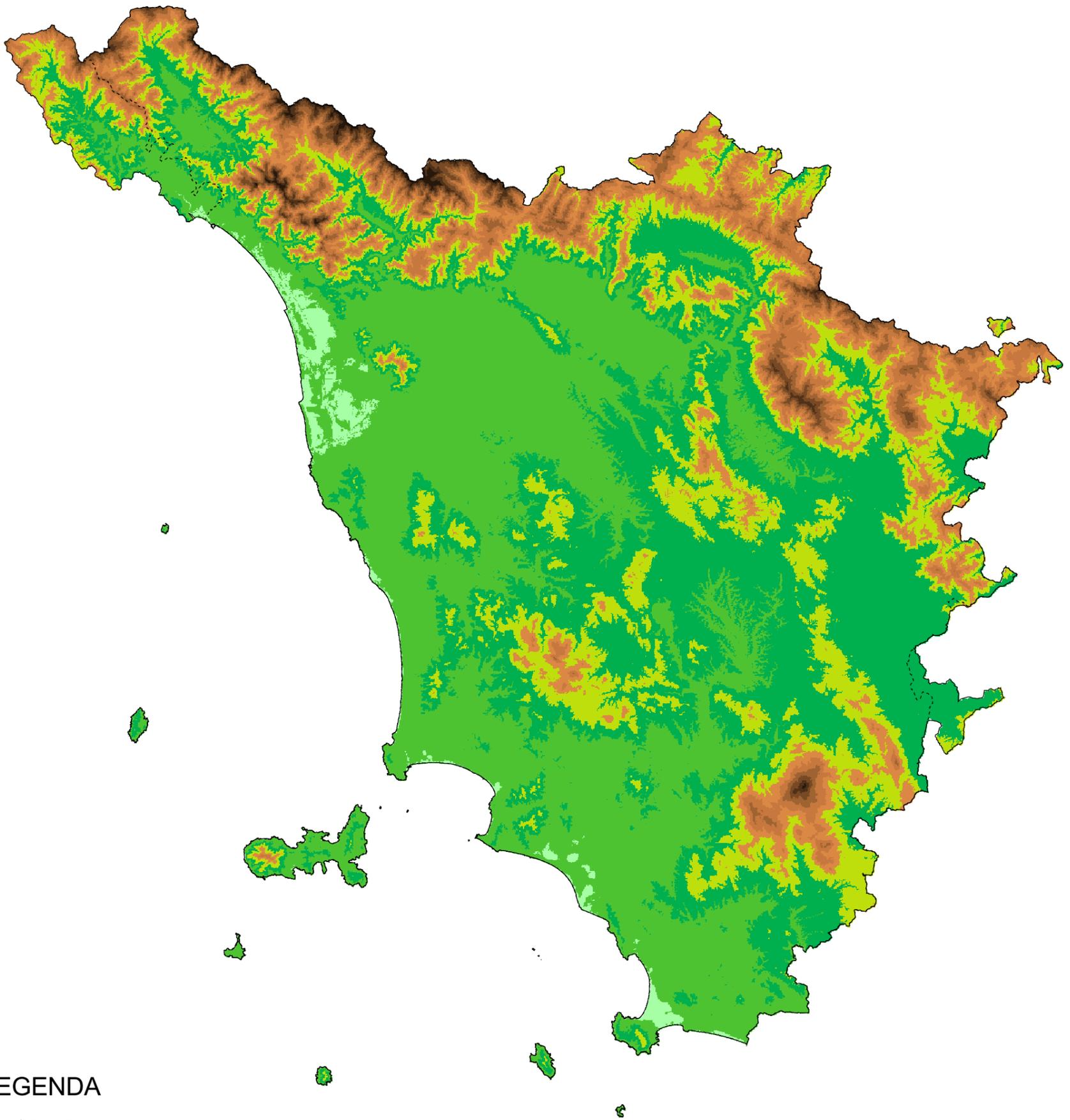
9. APPENDICE 3: DATI TERRITORIALI A SCALA DI BACINO

Nelle figure seguenti sono rappresentati i dati territoriali a scala di bacino.

In particolare si riportano:

- **La mappa delle quote:** ovvero la rappresentazione distribuita delle quote.
- **La mappa della geolitologia:** ovvero la rappresentazione distribuita delle informazioni cartografiche riguardanti geolitologia e/o pedologia.
- **La mappa dell'uso del suolo:** ovvero la rappresentazione distribuita delle informazioni relative all'uso del suolo.
- **La mappa dell'erodibilità:** ovvero la rappresentazione distribuita della perdita annua di suolo espressa in *tonn/(ha anno)*

Mappa delle quote

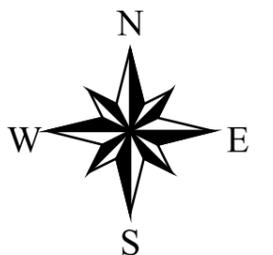


LEGENDA

--- Confini regionali

Quote [m s.l.m.]

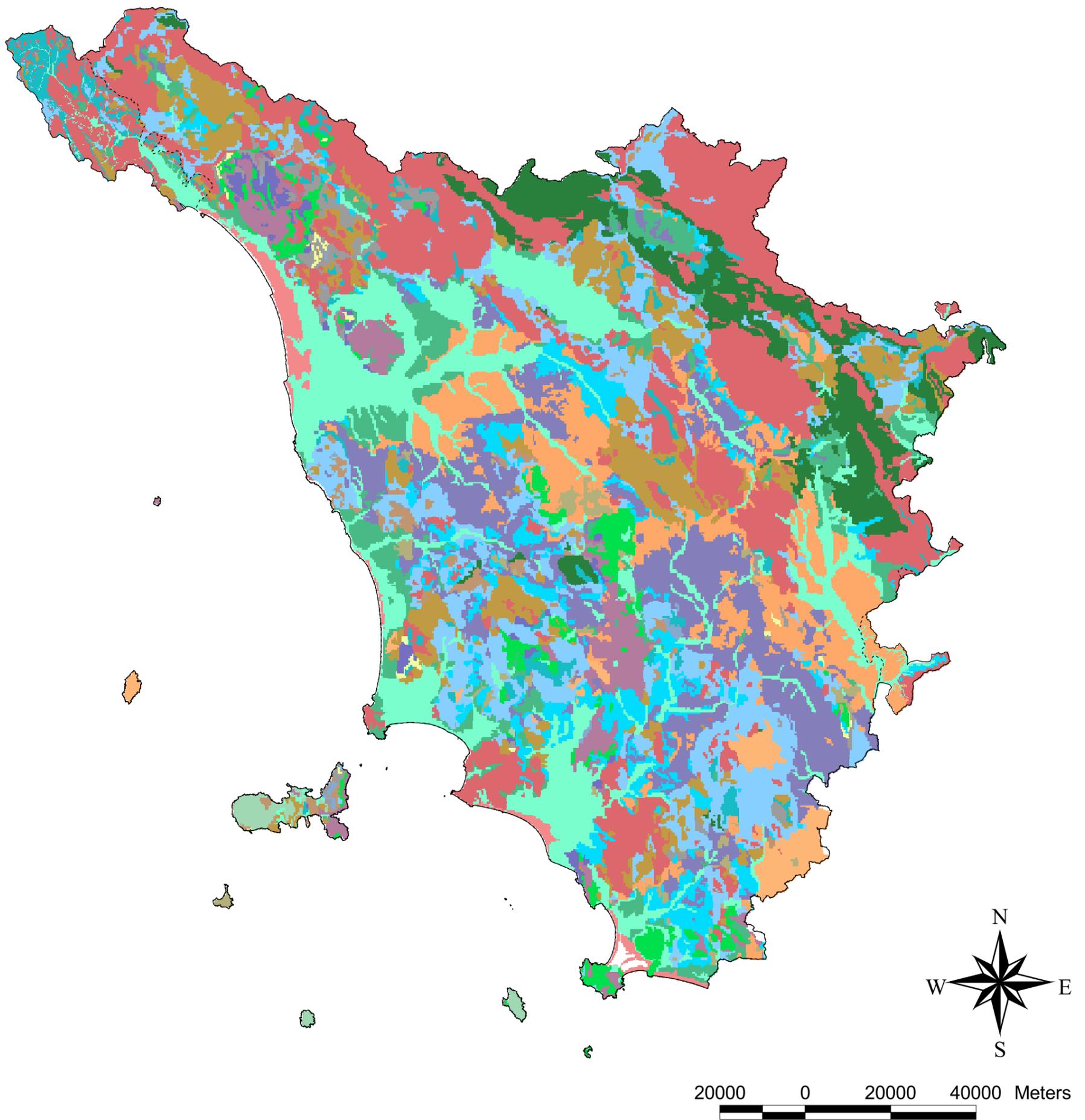
Lightest Green	-10 - 0
Light Green	0 - 200
Medium Green	200 - 400
Yellow-Green	400 - 600
Light Orange	600 - 800
Orange	800 - 1000
Dark Orange	1000 - 1200
Brown	1200 - 1400
Dark Brown	1400 - 1600
Black	>1600



20000 0 20000 40000 Meters

A horizontal scale bar with markings at 0, 20000, and 40000 meters. The bar is divided into segments corresponding to these values.

Mappa della geolitologia



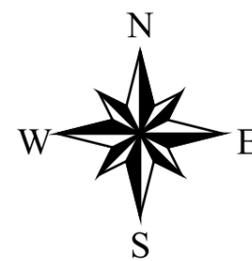
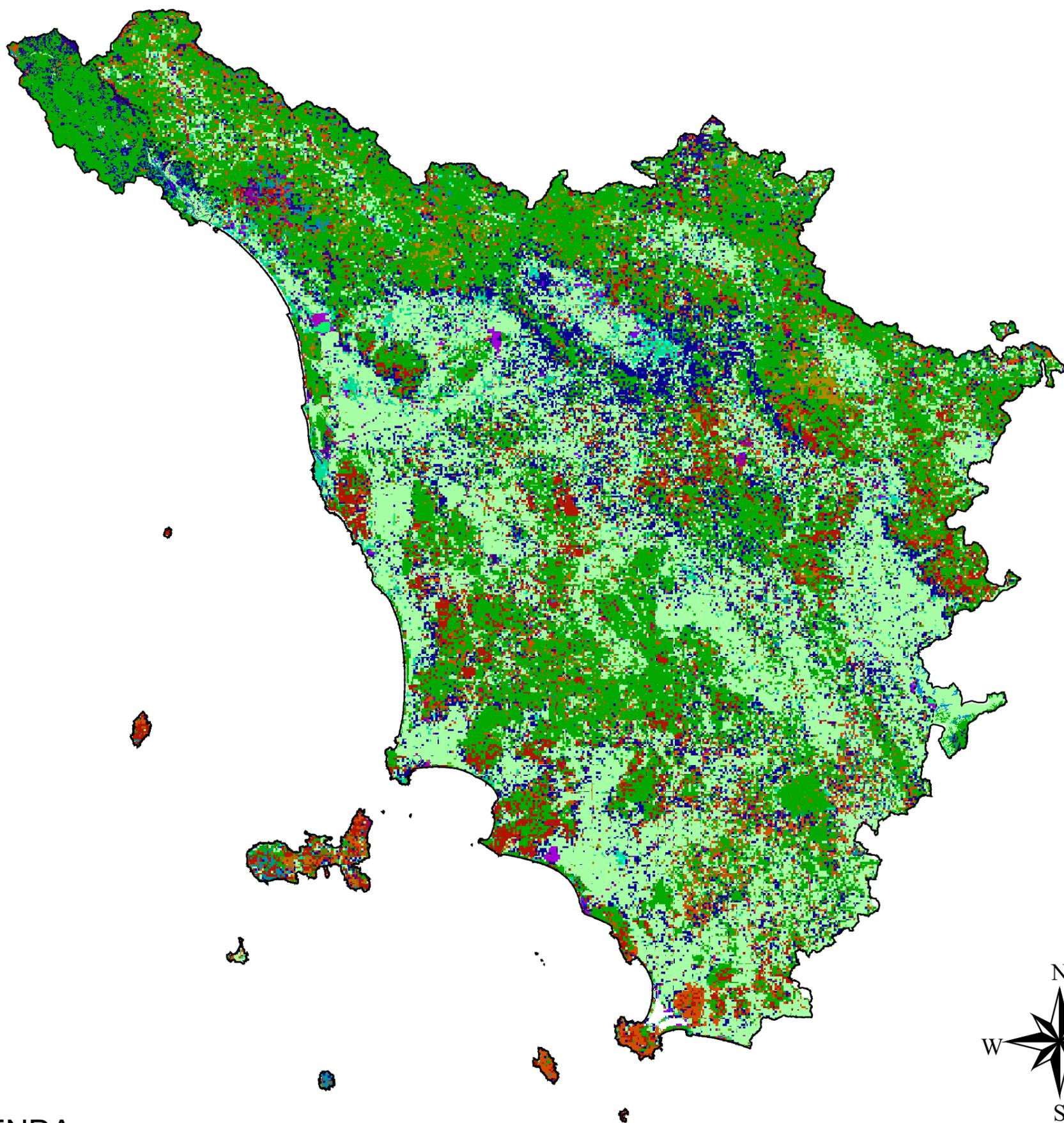
LEGENDA

--- Confini regionali

Geolitologia

- | | |
|---|--|
| Sabbie di spiaggia e dune costiere recenti + Laguna di Orbetello (Gr) | Calcari massicci o grossolanamente stratificati con rare intercalazioni |
| Depositi alluvionali, di colmata e palustri, terreni torbosi | Calcari ben stratificati con intercalazioni, calcari litografici, calcari selciferi, subordinatamente calcareniti, calcari marnosi |
| Travertini, calcari detritico-organogeni | Calcari stratificati nodulari, calcari marnosi con intercalazioni marnose |
| Depositi fluviali, lacustri e marini, terrazzati | Calcari cavernosi, anidriti, dolomie e calcari dolomitici |
| Conglomerati poligenici con intercalazioni di sabbie ed argille, brecce sedimentarie poligeniche | Diaspri, radiolariti e scisti silicei |
| Depositi argillosi di origine fluvio-lacustre o marina, con intercalazioni di argille, ghiaie ed altri materiali | Scisti metamorfici, filladi, anageniti |
| Depositi sabbiosi di origine fluvio-lacustre o marina, con intercalazioni di argille ghiaie ed altri minerali; arenarie poco cementate, "panchina", dune antiche, molasse | Rocce ignee effusive acide |
| Marne, argilliti, argilloscisti | Rocce ignee effusive acide |
| Arenarie quarzo-feldspatiche, spesso turbiditiche, con intercalazioni di marne ed argilliti | Rocce ofiolitiche |
| Scilti silteosi, marne, argilliti ed arenarie spesso turbiditiche | Gessi, anidriti con intercalate marne, argille, sabbie (formazione Gessoso-solfifera) |
| | Alternanze di calcari, calcareniti, calcari marnosi e marne spesso gradate brecciole calcaree |

Mappa dell'uso del suolo



20000 0 20000 40000 Meters

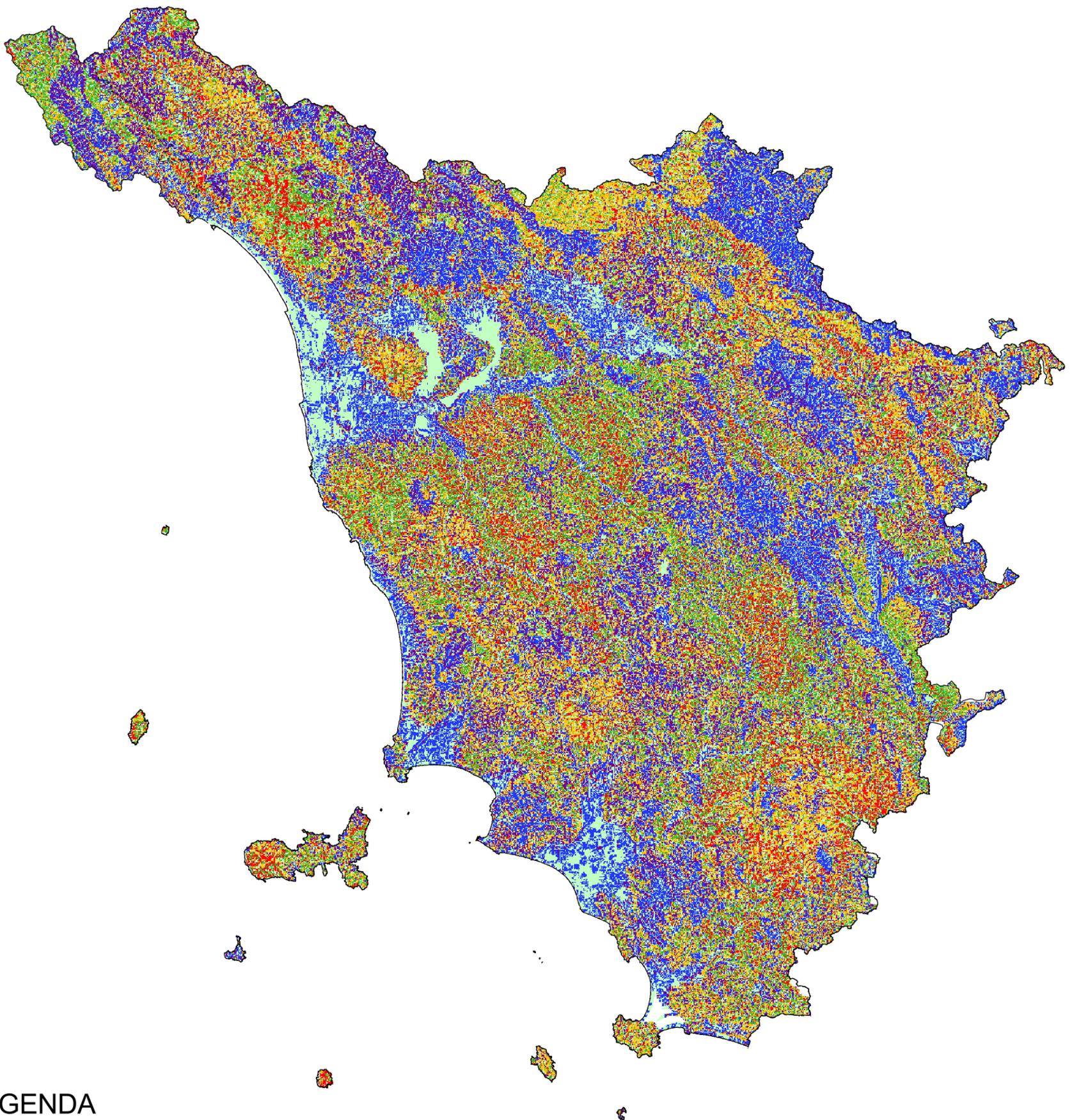
LEGENDA

 Confini regionali

Uso del suolo

- | | |
|---|---|
|  Aree residenziali |  Rimboschimento |
|  Aree commerciali e servizi |  Aree boschive transitoriamente prive di vegetazione |
|  Aree industriali |  Castagneti da frutto |
|  Trasporti, comunicazioni |  Cespugliati arbusteti macchia mediterranea |
|  Verde pubblico, giardini, parchi |  Corsi d'acqua |
|  Colture erbacee |  Laghi, bacini artificiali |
|  Colture orto-floro-vivaistiche e frutteti in genere |  Baie, estuari, lagune |
|  Allevamenti zootecnici specializzati - Impianti agro industriali |  Aree paludose con vegetazione arborea ed arbustiva |
|  Pertinenze agricole |  Aree paludose con vegetazione erbacea |
|  Praterie, pascoli, incolti erbacei |  Spiagge, dune costiere, litorali salati, scogliere marine |
|  Praterie, pascoli, incolti con alberi, arbusti e cespugli sparsi |  Affioramenti rocciosi, calanchi, aree denudate per erosione |
|  Soprassuoli boschivi |  Aree estrattive, cave, miniere, discariche |
|  Boschetti |  Formazioni vegetali lineari |

Mappa dell'erodibilità

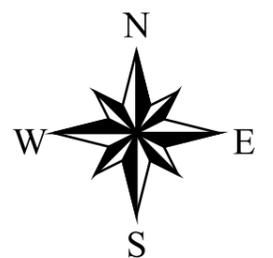


LEGENDA

∕ Confini regionali

Perdita di suolo
[t/(ha anno)]

- 0-0.01
- 0.01-0.5
- 0.5-2
- 2-10
- 10-40
- >40



20000 0 20000 40000 Meters



10. BIBLIOGRAFIA

- **Wischmeier, W.H., and Smith, D.D.**, 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains – a guide for selection of practise for soil and water conservation. Agricultural Handbook No. 282. US Department of Agricolture.
- **Wischmeier, W.H., and Smith, D.D.**, 1978. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. Agricultural Handbook No. 537. US Department of Agricolture, Washington, DC.
- **Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., and Yoder, D.C.**, 1997. Predicting soil erosion by water – a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agricultural Handbook No. 703. US Department of Agricolture.
- **Soil Conservation Service**, "SCS National Engineering Handbook, Section 3, Sedimentation", Washington, D.C., 1962.
- **Richards, K.**, 1982. Rivers. Form and Process in Alluvial Channels, Methuen, London.
- **Shen H. W.**, 1979, Introduction, flow resistance, sediment transport, Modeling of Rivers, H. W. Shen (Ed.), John Wiley & Sons, New York, Chap. 1, 1-25-1 to 1-29.
- **Lane, L. J.; Foster, G. R.; Hakonson, T. E.**, Watershed erosion and sediment yield affecting contaminant transport. Proceedings of the USDOE Symposium for Environmental Research on actinide Elements; 1983 Nov; Hilton Head, South Carolina. ; 1986.

- **Regione Toscana**, “Regionalizzazione delle portate di piena nel territorio della regione toscana”, a cura di: PIN - Centro Studi Ingegneria, Università di Firenze, Firenze, 2004.
- **Provveditorato alle Opere Pubbliche della Toscana**, Studio per il piano di Bacino del Fiume Magra – Caratteristiche del trasporto solido e della evoluzione morfologica degli alvei e dei versanti, Firenze 1991.