



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”
Polo delle Scienze e delle Tecnologie
CENTRO INTERDIPARTIMENTALE DI RICERCA
“AMBIENTE” (C.I.R.AM.)

DOTTORATO DI RICERCA IN
VALUTAZIONE E MITIGAZIONE DEL RISCHIO AMBIENTALE

Indirizzo: Riqualificazione dei sistemi territoriali

- XIX CICLO -

***“Analisi dei processi di erosione del
suolo nel bacino del fiume Tusciano”***

Coordinatore:
Ch.mo Prof. Lucio Lirer

Tutori:
Ch.mo Prof. Maurizio Giugni
Ch.mo Prof. Daniela Ducci

Candidata:
dr.Chim. Mariarosaria Zampoli

INDICE

<i>INTRODUZIONE</i>	Pag. 1
<i>CAP. 1 - PROCESSI DI EROSIONE A SCALA DI BACINO</i>	
Par. 1.1. – I processi erosivi	Pag. 4
Par. 1.2. – L’erosione idrica	Pag. 7
Par. 1.3. – Modelli per la valutazione dell’erosione del suolo	Pag.16
<i>CAP. 2 - IL BACINO PILOTA</i>	
Par. 2.1. – Inquadramento dell’area di studio	Pag. 28
Par. 2.2. – Caratterizzazione climatica del territorio	Pag. 30
Par. 2.3.1. – Piovosità	Pag. 30
Par. 2.3.2. – Termometria	Pag. 33
Par. 2.3. – Caratteristiche morfologiche e uso del suolo	Pag. 38
Par. 2.4. – Caratteristiche geologiche e litologiche	Pag. 43
<i>CAP. 3 – IL SISTEMA INFORMATIVO TERRITORIALE</i>	
Par. 3.1. – Introduzione	Pag. 49
Par. 3.2. – Acquisizione e memorizzazione dei dati	Pag. 51
Par. 3.3. – Sistemi di riferimento	Pag. 54
Par. 3.4. – Visualizzazione dei dati	Pag. 63
Par. 3.5. – Il software utilizzato	Pag. 65
<i>CAP. 4 – APPLICAZIONE DELLA RUSLE AL BACINO PILOTA</i>	
Par. 4.1. – Struttura della RUSLE	Pag. 67
Par. 4.2. – L’erosività della pioggia, R	Pag. 68
Par. 4.3. – L’erodibilità del suolo, K	Pag. 73
Par. 4.4. – Il fattore topografico, LS	Pag. 81
Par. 4.5. – Il fattore di copertura vegetale e le pratiche di gestione, C	Pag. 87
Par. 4.6. – Le pratiche antierosive, P	Pag. 103
Par. 4.7. – Stima dell’erosione del bacino del fiume Tusciano	Pag. 105

CAP. 5 – ANALISI GEOMORFICA QUANTITATIVA

Par. 5.1. – L’approccio quantitativo in geomorfologia fluviale	Pag. 111
Par. 5.2. – Gerarchizzazione dei reticoli idrografici	Pag. 112
Par. 5.3. – Analisi morfologica dei bacini idrografici	Pag. 117
Par. 5.4. – Analisi quantitativa	Pag. 121
Par. 5.5. – Stima del trasporto torbido del bacino del fiume Tusciano	Pag. 125

CAP. 6 – INTERVENTI O SCENARI DI MITIGAZIONE

Par. 6.1. – Generalità sugli interventi di mitigazione	Pag. 127
Par. 6.2. – I rivestimenti antierosivi	Pag. 129
Par. 6.3. – Interventi che modificano la morfologia dei versanti	Pag. 133
Par. 6.4. – Pratiche di conservazione del suolo: un esempio di applicazione.	Pag. 136

CAP. 7 – CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

RINGRAZIAMENTI

BIBLIOGRAFIA

ALLEGATI

Allegato 1 – Fattori per l’applicazione del modello P.S.I.A.C.	Pag. 163
Allegato 2 – Tavole per l’applicazione del modello di Gavrilovic. Valori dei fattori Y, G e X	Pag. 164
Allegato 3 – Dati piovosità media mensile per stazione pluviometrica per il periodo 1959-2004	Pag. 165
Allegato 4 – Valori di piovosità media stagionale (periodo 1959-2004).	Pag. 166
Allegato 5 – Valori medi mensili delle temperature massime, minime, medie e delle escursioni termiche. Periodo di osservazione 1963-1999	Pag. 167
Allegato 6 – Dati di piovosità totale annua (P_T), piovosità massima giornaliera (MG) e piovosità massima oraria (MO) e numero di giorni piovosi medi (NGP). Periodo di osservazione 1951- 1999	Pag. 168

INDICE DELLE TABELLE

CAP. 1 - PROCESSI DI EROSIONE A SCALA DI BACINO

Tab. 1.1 – Classi di erosione netta media annua secondo il modello P.S.I.A.C.	Pag. 22
Tab. 1.2 – Classi di erosività (IF) secondo il modello Manrique	Pag. 24
Tab. 1.3 – Classi di erodibilità del suolo (K) secondo il modello Manrique	Pag. 25
Tab. 1.4 – Classi di valore del fattore topografico (LS) secondo il modello Manrique	Pag. 25
Tab. 1.5 – Raggruppamento in classi per la determinazione del rischio secondo il modello di Manrique.	Pag. 25

CAP. 2 - IL BACINO PILOTA

Tab. 2.1 – Stazioni termometriche campane con indicazione della quota (in m s.l.m.) e temperatura media annua (in °C).	Pag. 36
Tab. 2.2 – Comuni facenti parte del bacino del fiume Tusciano con relativa popolazione residente ed estensione territoriale.	Pag. 38

CAP. 3 – IL SISTEMA INFORMATIVO TERRITORIALE

Tab. 3.1 – Vantaggi e svantaggi dei metodi di rappresentazione raster e vettoriale.	Pag. 53
---	---------

CAP. 4 – APPLICAZIONE DELLA RUSLE AL BACINO PILOTA

Tab. 4.1 – Calcolo del fattore R, aggressività della pioggia, effettuato con diverse metodologie.	Pag. 71
Tab. 4.2 – Valori di K in funzione della tessitura e della sostanza organica	Pag. 74
Tab. 4.3 – Parametri estratti dalla carta dei suoli 1:50000	Pag. 79
Tab. 4.4 – Efficacia relativa della copertura vegetale nella protezione del suolo dall'erosione	Pag. 89
Tab. 4.5 – Percentuale di runoff in funzione del tipo di copertura del suolo.	Pag. 90
Tab. 4.6 – Stima del fattore di copertura vegetale in funzione dell'uso del suolo.	Pag. 92
Tab. 4.7 – Suddivisione in classi della perdita di suolo proposta da Stone e Hilborn (2000)	Pag. 107

CAP. 5 – ANALISI GEOMORFICA QUANTITATIVA

Tab. 5.1 – Parametri geomorfici relativi al bacino del fiume Tusciano	Pag. 125
Tab. 5.2 – Stima del trasporto torbido per il bacino del fiume Tusciano	Pag. 126

INDICE DELLE FIGURE

CAP. 1 - PROCESSI DI EROSIONE A SCALA DI BACINO

Fig. 1.1 – Effetto delle gocce impattanti sullo strato superficiale del suolo	Pag. 8
Fig. 1.2 – Esempi di erosione areale	Pag. 9
Fig. 1.3 – Erosione in rivoli	Pag. 9
Fig. 1.4 – Esempio di gully erosion	Pag. 10
Fig. 1.5 – Esempio di forme erosive in atto su un versante	Pag. 11
Fig. 1.6 – Classi tessiturali del suolo in relazione al contenuto di sostanza organica e di argilla.	Pag. 13
Fig. 1.7 – Relazione tra piovosità media annua ed erosione del suolo	Pag. 15

CAP. 2 - IL BACINO PILOTA

Fig. 2.1 – Bacino idrografico del fiume Tusciano con indicazione dei principali affluenti	Pag. 28
Fig. 2.2 – Localizzazione delle stazioni pluviometriche	Pag. 31
Fig. 2.3 – Andamento della piovosità media annua in funzione della quota altimetrica delle stazioni pluviometriche	Pag. 33
Fig. 2.4 – Localizzazione delle stazioni termometriche.	Pag. 34
Fig. 2.5 – Andamento stagionale delle temperature massime, medie e minime per ogni stazione termometrica	Pag. 35
Fig. 2.6 – Temperatura media annua (°C) in funzione della quota altimetrica delle stazioni termometriche (m s.l.m.)	Pag. 36
Fig. 2.7 – Temperature medie annue per il bacino del Tusciano	Pag. 37
Fig. 2.8 – Copertura comunale percentuale del bacino.	Pag. 39
Fig. 2.9 – Copertura e uso del suolo estratta da CLC00 della Regione Campania (Scala 1:50.000)	Pag. 40
Fig. 2.10 – Carta dell'uso agricolo del suolo del bacino del fiume Tusciano.	Pag. 41
Fig. 2.11 – Carta geologica 1:100000 foglio n. 185 – Salerno	Pag. 43
Fig. 2.12 - Carta geologica 1:100000 foglio n. 186 – Sant'Angelo dei Lombardi	Pag. 44
Fig. 2.13 - Carta geologica 1:100000 foglio n. 197 – Amalfi	Pag. 45
Fig. 2.14 - Carta geologica 1:100000 foglio n. 198 – Eboli	Pag. 45
Fig. 2.15 – Carta geolitologici del bacino del Tusciano	Pag. 46

CAP. 3 – IL SISTEMA INFORMATIVO TERRITORIALE

Fig. 3.1 – Definizione adottata per definire un Sistema Informativo Geografico.	Pag. 50
Fig. 3.2 – Differenza tra modello vettoriale e modello raster.	Pag. 51
Fig. 3.3 – Proiezione cilindrica diretta.	Pag. 54
Fig. 3.4 – Proiezione cilindrica inversa.	Pag. 55
Fig. 3.5 – Proiezione conica.	Pag. 55
Fig. 3.6 – Rappresentazione cilindrica conforme di Mercatore	Pag. 56
Fig. 3.7 – Reticolato geografico nella proiezione di Gauss.	Pag. 57

Fig. 3.8 – Fusi nella carta di Gauss.	Pag. 57
Fig. 3.9 – Suddivisione del globo terrestre in zone UTM	Pag. 58
Fig. 3.10 – Fusi della cartografia italiana nel sistema Gauss-Boaga	Pag. 59
Fig. 3.11 – Esempio di carta tematica con visualizzazione degli attributi	Pag. 65

CAP. 4 – APPLICAZIONE DELLA RUSLE AL BACINO PILOTA

Fig. 4.1 – Fattori della RUSLE e loro fonte di reperimento.	Pag. 67
Fig. 4.2 – Stima del fattore R per il bacino del fiume Tusciano.	Pag. 72
Fig. 4.3 – Classificazione delle particelle di suolo in relazione alla misura (espressa in μm)	Pag. 73
Fig. 4.4 – Nomogramma per la valutazione dell'indice di erodibilità K.	Pag. 76
Fig. 4.5 – Carta della copertura piroclastica in scala 1:25.000.	Pag. 78
Fig. 4.6 – Stima del fattore K per il bacino del fiume Tusciano.	Pag. 80
Fig. 4.7 – Fattore di erodibilità del suolo (K) in funzione della media geometrica del diametro delle particelle (D_g) espresso in mm.	Pag. 80
Fig. 4.8 – Grafico da utilizzare per il calcolo del fattore topografico LS.	Pag. 81
Fig. 4.9 – Modello digitale del terreno risoluzione $20\text{m} \times 20\text{m}$.	Pag. 82
Fig. 4.10 – Carta delle pendenze del bacino del Tusciano.	Pag. 83
Fig. 4.11 – Diagramma di flusso che illustra il processo di calcolo del fattore LS utilizzato nella RUSLE.	Pag. 84
Fig. 4.12/a – Stima del fattore L (lunghezza dei versanti) per il bacino del Tusciano.	Pag. 85
Fig. 4.12/b – Stima del fattore S (inclinazione dei versanti) per il bacino del Tusciano.	Pag. 85
Fig. 4.13 – Stima del fattore topografico, LS per il bacino del fiume Tusciano.	Pag. 86
Fig. 4.14 – Effetti della morfologia della corona e della spaziatura delle piante sull'intercettazione della pioggia e sul "flusso di stelo" (stem flow).	Pag. 90
Fig. 4.15 – Distribuzione del fattore C della RUSLE per il bacino del fiume Tusciano.	Pag. 94
Fig. 4.16 – Spettro elettromagnetico.	Pag. 95
Fig. 4.17 – Riflettanza della radiazione elettromagnetica rilevata dal satellite.	Pag. 96
Fig. 4.18 – Riflettanza della radiazione nelle lunghezze d'onda del rosso e del vicino infrarosso da parte di tipi di vegetazione diversi.	Pag. 97
Fig. 4.19/A – Immagine Landsat7 del 25/11/01.	Pag. 98
Fig. 4.19/B – Immagine Landsat5 del 26/06/01.	Pag. 98
Fig. 4.20 – Indice vegetazionale non normalizzato.	Pag. 99
Fig. 4.21 – Indice vegetazionale normalizzato (NDVI).	Pag. 99
Fig. 4.22/a – Stima del fattore C riferita al periodo estivo.	Pag. 100
Fig. 4.22/b – Stima del fattore C riferita al periodo invernale.	Pag. 101
Fig. 4.23 – Processo di calcolo della perdita di suolo effettuato con Arcview.	Pag. 106

CAP. 5 – ANALISI GEOMORFICA QUANTITATIVA

Fig. 5.1 – Gerarchizzazione del reticolo idrografico del Tusciano.	Pag. 113
Fig. 5.2 – Schematizzazione di un reticolo idrografico e indicazione dei punti di anomalia gerarchica.	Pag. 115

Fig. 5.3 – Variabilità della densità di drenaggio in relazione all’erodibilità e alla permeabilità di diversi. Pag. 118

CAP. 6 – INTERVENTI O SCENARI DI MITIGAZIONE

Fig. 6.1 - Particolare di biorete in fibra naturale di juta (a) e in fibra naturale di cocco (b) Pag. 129

Fig. 6.2 - Particolare di biofeltro in fibre vegetali biodegradabili Pag. 130

Fig. 6.3 - Particolare di biostuoie in paglia (a), in cocco (b), in fibre vegetali di paglia e cocco (c) Pag. 130

Fig. 6.4 – Esempio di geostuoia tridimensionale in polipropilene Pag. 130

Fig. 6.5 – Esempio di geocompositi (accoppiamento di georeti con capacità drenante con geotessili ad azione filtrante). Pag. 130

Fig. 6.6 – Esempio di feltro vegetativo preseminato Pag. 130

Fig. 6.7 - Schema di funzionamento di una geocella. Pag. 131

Fig. 6.8 - Inerbimento mediante la tecnica dell'idrosemina di un'opera di sostegno in terra rinforzata Pag. 132

Fig. 6.9 – Terrazzamento tipico della costiera amalfitana nel quale sono stati utilizzati i muretti a secco Pag. 134

Fig. 6.10 – Esempio di viminata utilizzato negli interventi di sistemazione e messa in sicurezza del Monte Somma. Pag. 135

Fig. 6.11 – Esempio di palizzata utilizzata per la sistemazione del sentiero lungo i Cognoli sul Monte Vesuvio. Pag. 135

Fig. 6.12– Uso del suolo nella zona collinare del Tusciano: solo in questa zona sono presenti ben 22 classi di uso del suolo. Pag. 137

Fig. 6.13: Nuova classificazione dell’uso agricolo del suolo della zona collinare del bacino del Tusciano Pag. 138

Fig. 6.14: Indicazione delle zone su cui è stata applicata una tecnica di conservazione del suolo. Pag. 139

Fig. 6.15: Uso delle cover crops in un arboreto Pag. 140

Fig. 6.16: Esempio di pacciamatura con materiale vegetale. Pag. 141

Fig. 6.17: Esempio di pacciamatura di un’aiuola effettuata con pietrame. Pag. 141

Fig. 6.18 – Esempio di lavorazione lungo le curva di livello Pag. 142

*“L’acqua disfa li monti e riempie le valli.
E vorrebbe la terra in perfetta sfericità,
s’ella potesse”*

(L. Da Vinci)

INTRODUZIONE

Le situazioni di degrado del suolo connesse agli interventi antropici, alle lavorazioni agricole e ad altre tecnologie adottate nelle pratiche agronomiche si possono manifestare in modo intensivo, con repentino sconvolgimento dell'ambiente fisico, o con lenti processi all'interno del terreno che producono modificazioni indesiderate fino alla perdita di suolo. Quest'ultimo processo è uno dei problemi a cui, negli ultimi anni, la comunità scientifica ha dedicato sempre maggiore attenzione (*De Rosa, 2003*).

I processi erosivi, derivanti dall'azione di agenti naturali e/o antropici, assumono maggiore importanza in territori particolarmente "vulnerabili", che vivono cioè su equilibri precari che possono essere rapidamente modificati da azioni antropiche (es. coltivazioni intensive, attività estrattive) portando a situazioni quasi irreversibili.

L'erosione del suolo, infatti, è un fenomeno che interessa il 35% della superficie delle terre emerse e, in condizioni normali, nell'arco di un anno, determina una perdita di suolo fertile pari a circa 10 tonnellate per ettaro, mentre la velocità di formazione di suolo fertile è di 2-3 tonnellate per ettaro e ancora minore nelle regioni aride (*Francese et al., 2005*).

In Italia, i due terzi dei suoli presentano problemi di degradazione che risultano più accentuati laddove è maggiore l'attività antropica (*Fonte APAT*), non solo di tipo agricolo ma anche derivante da una pianificazione urbanistica del territorio (aree urbane ed industriali con relative infrastrutture) che spesso non ha tenuto conto dell'impatto ambientale prodotto soprattutto sul suolo, con conseguente innesco di fenomeni degradativi, nella maggior parte dei casi molto evidenti.

Il processo di degradazione più evidente è l'*erosione*, che consiste nel distacco e nell'allontanamento di particelle solide dalla superficie del suolo, che può essere dovuta a vento, acqua o altri agenti. L'azione eolica è il principale agente erosivo nelle regioni aride e semiaride della terra, mentre nelle regioni temperate i rischi maggiori sono connessi all'erosione idrica superficiale e fluviale sui versanti e incanalata.

La velocità e l'intensità del processo di erosione idrica, dipendono non solo dall'acqua, ma anche dalla composizione e dallo stato fisico del terreno al momento dell'interazione acqua-terreno.

L'erosione è un fenomeno naturale appartenente al normale ciclo di vita della terra e, quindi, non del tutto annullabile, ma a destare preoccupazioni alla comunità scientifica mondiale è l'erosione accelerata che, quando innescata, è difficilmente contrastabile.

In realtà, in tutti i tipi di colture agrarie il suolo subisce un'erosione accelerata rispetto a quella naturale ma, laddove si verifica uno sfruttamento intensivo del suolo, si ha una maggiore sottrazione di nutrienti rispetto a quanti ne vengano ripristinati. Tale sbilanciamento avviene insieme ad una graduale riduzione della sostanza organica, al deterioramento della struttura chimico-fisica e alla modificazione del bilancio idrologico del suolo.

Circa il 77% del territorio italiano è soggetto al rischio di erosione accelerata (*Fonte Apat*), anche a causa della mancanza di misure conservative del suolo (sistemazioni idraulico-agrarie, drenaggi, inerbimenti) e dell'aumento dell'intensità delle piogge che presentano eventi estremi più intensi e ravvicinati, legati all'ormai noto mutamento del clima a scala planetaria (*De Rosa, 2003*).

Un altro grande problema legato all'erosione del suolo è l'inquinamento delle acque superficiali, dovuto sia al fenomeno di dilavamento superficiale, che alla formazione di un deposito limoso nei corsi d'acqua e nei canali d'irrigazione.

Il trasporto di materiale solido lungo un corso d'acqua può essere generato da cause *naturali* o *antropiche*, che possono essere *diffuse* lungo i versanti del bacino o *localizzate* lungo la rete idrografica.

Il dilavamento dello strato superficiale dei versanti e la conseguente erosione alla base degli stessi sono fenomeni naturali che dipendono dai caratteri geolitologici dei versanti e delle sponde fluviali.

Le pratiche di uso del suolo, le tecniche agricole, l'urbanizzazione e le opere realizzate in alveo o lungo i versanti rappresentano, invece, i principali fattori antropici, rispettivamente diffusi e localizzati, che originano l'apporto solido ad una rete idrografica.

I fattori citati, sia naturali che antropici, diffusi sulla superficie del bacino idrografico, governano l'entità del trasporto solido in sospensione, mentre le cause che agiscono localmente sulla produzione di sedimenti (fattori localizzati) determinano essenzialmente entità e caratteristiche del trasporto solido di fondo (*Viparelli R., 1998*).

Il fatto che l'erosione sia un processo complesso influenzato da numerosi fattori quali il clima, la tipologia di suolo, la morfologia del paesaggio, l'idrologia, la copertura vegetale, le colture, nonché i sistemi di lavorazione e di coltivazione condotti nell'area, ha determinato un aumento

della richiesta di strumenti che predicano l'impatto antropico sul territorio (modelli di simulazione), al fine di prevenire cambiamenti del territorio irrimediabili. Gli strumenti di simulazione già esistenti sono in continuo sviluppo in quanto vengono richieste informazioni sempre più dettagliate sulla distribuzione spaziale e temporale dei fenomeni modellati. Inoltre, l'integrazione con i sistemi GIS permette di gestire in modo ottimale i dati territoriali (**Francese et al., 2005**).

L'incidenza dei fenomeni erosivi, in termini di perdita di aree produttive e di danni alle infrastrutture, nonché i risvolti ambientali del problema (inquinamento diffuso di origine agricola e/o desertificazione), hanno richiamato l'attenzione, anche dell'opinione pubblica, sulla necessità di approfondire le conoscenze, di monitorare il fenomeno e di individuare delle idonee tecniche di intervento (**Bagarello e Ferro, 2006**).

È proprio su alcuni di questi aspetti che si concentra il lavoro di Dottorato svolto, in cui è stata utilizzata l'equazione universale rivisitata di perdita del suolo (*RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation*), formulata originariamente da **Wischmeier e Smith** nel 1978 e rivista da **Renard et al. (1991)**, per valutare il rischio di erosione sul territorio del *bacino del fiume Tusciano*.

Propedeutica all'applicazione della *RUSLE* al bacino del fiume Tusciano è stata la *messa a punto del database geografico* del bacino realizzato con sistemi G.I.S. nel sistema di riferimento WGS84.

La stima del materiale eroso trasportato dai corsi d'acqua verso la sezione di chiusura del bacino, il confronto tra i metodi di stima dell'erosione, la redazione di "carte del rischio erosivo" con la relativa individuazione di zone critiche e la proposta di "scenari alternativi" e/o di interventi di mitigazione del fenomeno rappresentano gli altri obiettivi, certamente non secondari, del lavoro svolto.

L'efficace sviluppo della tesi di Dottorato è stato reso possibile dalle collaborazioni con l'Autorità di Bacino in Destra Sele, nel cui territorio di competenza ricade il bacino del fiume Tusciano, e con l'Unità di Supporto Locale n.6, Progetto Operativo Difesa Suolo (PODiS) – Regioni Ob. 1 (PON-ATAS 2000-2006) – Direzione Generale Difesa del Suolo – Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, che hanno fornito la gran parte dei dati richiesti dal modello la cui implementazione è stata effettuata mediante un idoneo sistema informativo geografico che ha consentito una gestione efficace della notevole mole di dati utilizzati: piovosità, uso del suolo, caratteristiche pedologiche, morfologia dei versanti, ecc..

CAPITOLO 1

PROCESSI DI EROSIONE A SCALA DI BACINO

Par. 1.1. - I processi erosivi

La degradazione del suolo può essere dovuta sia a cause naturali che ad attività antropiche. Tale fenomeno è un processo biofisico che può essere influenzato da cause socio-economiche e politiche; infatti le attività antropiche che insistono sul territorio determinano frequentemente l'estensione della degradazione.

È possibile distinguere tre forme di degradazione: biologica, chimica e fisica:

- la ***degradazione biologica*** che include la riduzione della sostanza organica dei suoli e dei processi di biodiversità;
- la ***degradazione chimica*** che comprende l'acidificazione, la salinizzazione e la perdita di nutrienti e di fertilità;
- la ***degradazione fisica*** che comprende la distruzione della struttura del suolo, la formazione di croste, la compattazione e l'erosione.

Quest'ultimo processo consiste nell'asportazione dello strato superficiale del suolo ed è un processo che può avere come agenti l'acqua (***erosione idrica***), il vento (***erosione eolica***) o, in certe zone e periodi, i ghiacciai (***erosione glaciale***).

L'azione eolica rappresenta un problema nelle regioni aride e semiaride della terra, dove la superficie è asciutta e priva o quasi di vegetazione.

Il potere erosivo del vento, (come dell'acqua, che sarà considerata successivamente) dipende dalla forza che esso esercita sul suolo che, a sua volta, è influenzata dalla scabrezza della superficie. La presenza di ostacoli e asperità, come massi, piante o altro, riduce la velocità del vento immediatamente sopra la superficie. Riguardo alla granulometria del terreno, saranno rimossi preferenzialmente sabbia fine e limo, rispetto ai ciottoli e alle pietre. L'erosione eolica può dunque asportare fino ad 1 cm all'anno di suolo in certe località, rispetto all'erosione idrica che, nelle zone semi-aride, erode 1 mm/anno (***Bell, 2001***).

Nelle regioni temperate i rischi maggiori sono connessi all'***erosione idrica***. È stato stimato che circa 1,1 miliardi di ettari di suolo nel mondo sono affetti da erosione idrica mentre 0,55 miliardi di ettari sono affetti dall'erosione eolica (***Teklehaimanot (ITC), 2003***).

L'erosione del suolo, dunque, provocando la perdita dello strato fertile, rappresenta senza dubbio la principale causa di degradazione del territorio ed è, attualmente, uno dei più seri

problemi ambientali nel mondo in quanto rappresenta una grave minaccia alla qualità del suolo, del territorio e delle riserve idriche dalle quali l'uomo dipende per il suo sostentamento.

Seppur con grande approssimazione, i valori estremi di formazione del suolo variano da 0,1 a 13,4 t/ha/anno, corrispondenti ad una crescita fra circa 0,01 e 0,9 mm/anno rispettivamente, viceversa in condizioni di erosione normali si calcola che vengono asportati da 0,25 ad 1,5 t/ha/anno di suolo (*Persicani, 1989*).

La situazione di equilibrio tra pedogenesi ed asportazione può essere alterata sia da eventi naturali con caratteri di eccezionalità (precipitazioni particolarmente intense, movimenti di massa, etc) che da attività antropiche (disboscamenti, eliminazione della rete idraulico-agraria per estensivizzazione delle colture, etc). I processi erosivi hanno una diversa incisività in funzione della velocità di formazione e dello spessore del suolo. Ad esempio, la pedogenesi è molto meno spinta su rocce granitiche rispetto ad un substrato costituito da rocce tenere; ne consegue che una intensità erosiva in grado di denudare il primo substrato potrebbe risultare sopportabile nella seconda situazione.

Negli ultimi quarant'anni, a livello mondiale, quasi un terzo del suolo arabile è stato perduto a causa del processo di erosione ed il processo continua con un tasso medio di 10 milioni di ettari l'anno (*Pimentel et al., 1995*).

Dagli studi del progetto LIFE, risulta che molti paesi della UE sono interessati dal problema della degradazione del suolo ed è stato stimato che il 12% della superficie europea totale è interessata dal fenomeno di erosione idrica, per un'estensione territoriale pari a circa 115 milioni di ettari. In Europa, il tasso medio annuo di erosione del suolo supera quello medio di formazione (17 tonn/ha/anno di suolo eroso a fronte di 1 tonn/ha/anno di suolo formato). Sia il fenomeno di erosione che quello di degradazione sono in aumento provocando, di conseguenza, un incremento del rischio di desertificazione delle aree agricole più vulnerabili (*ECAF, 1999*).

Nell'area mediterranea, il processo erosivo può raggiungere perdite di 20-40 tonn/ha di suolo in un solo evento piovoso, con punte di 100 tonn/ha in caso di eventi meteorici eccezionali.

Secondo il programma CORINE (*SINANET-APAT*), le percentuali delle aree ad elevato rischio potenziale di erosione nei Paesi del Mediterraneo sono alquanto disomogenee; variano infatti tra l'1% e il 43% raggiungendo picchi in Portogallo (68%) e Turchia (>70%). Le perdite in tali paesi variano tra 15 e 250 t/ha/anno. *Nel caso dell'Italia, l'area interessata da rischio potenziale elevato di erosione è stata stimata, all'incirca pari al 27%, e quella da rischio attuale pari a circa il 10% (Iaquinta & Terranova, 2004).*

Secondo *Fontana e Venturi (1999)*, la superficie soggetta al rischio erosione, invece, è pari a circa il 62% del territorio nazionale.

Par. 1.2. – L'erosione idrica

Le principali cause di erosione del suolo sono la deforestazione, la coltivazione di pendii scoscesi senza l'adozione di misure conservative, l'uso inappropriato del suolo e le piogge intense. Come conseguenza dell'erosione, la produttività del suolo diminuisce drammaticamente, in quanto il processo erosivo provoca negli orizzonti superficiali del suolo una riduzione della sostanza organica, dell'argilla e di altre frazioni colloidali e, quindi, un assottigliamento dello spessore utile per le radici delle piante e per la riserva di nutrienti. L'erosione, inoltre, favorisce o aggrava fenomeni quali l'acidificazione, la lisciviazione, l'eutrofizzazione, la costipazione e la perdita di attività biologica.

Il distacco delle particelle di suolo dallo strato superficiale avviene quando le forze erosive delle gocce di pioggia e il dilavamento superficiale superano la resistenza del suolo all'erosione (***Teklehaimanot (ITC), 2003***). Tale processo può essere dovuto all'impatto delle gocce di pioggia, al deflusso superficiale o al deflusso nelle fratture, fenomeni che hanno luogo durante gli eventi piovosi.

L'erosione è, quindi, un processo complesso influenzato da numerosi fattori quali il clima, la tipologia di suolo, la morfologia del paesaggio, l'idrologia, la copertura vegetale, le colture nonché i sistemi di lavorazione e di coltivazione condotti nell'area in esame. Tali fattori sono tra loro correlati ed in grado di determinare, in differente misura, l'entità del processo erosivo e le sue variazioni nello spazio e nel tempo.

Le forme erosive, derivanti dall'effetto dell'azione combinata dell'acqua meteorica e delle proprietà fisiche del terreno, possono essere così raggruppate (***Balacco, 2003***):

- erosione da impatto (*splash erosion*);
- erosione areale (*interrill o sheet erosion*);
- erosione a rivoli (*rill erosion*);
- erosione incanalata profonda (*gully erosion*).

L'*erosione da impatto (Splash erosion - Fig. 1.1)* rappresenta l'azione impattante delle gocce d'acqua sul terreno quando questo non è ancora saturo. Ciò provoca la disgregazione della coltre superficiale e il distacco delle particelle che la costituiscono e comporta la disponibilità di trasporto da parte della corrente idrica delle stesse.

Tale tipo di erosione è meno evidente laddove è maggiore la copertura vegetale che svolge un'azione mitigatrice riducendo l'energia di impatto al suolo delle gocce. L'erosione da impatto, dunque, è tanto più importante quanto maggiore è l'energia posseduta dalle gocce,

quanto più piccole sono le dimensioni delle particelle e quanto più deboli sono i legami di coesione tra esse. Anche quando le gocce non sono dotate di energia tale da rompere i legami tra le particelle costituenti il terreno inducono, umidificando il terreno, una diminuzione della resistenza dello stesso ad essere eroso.

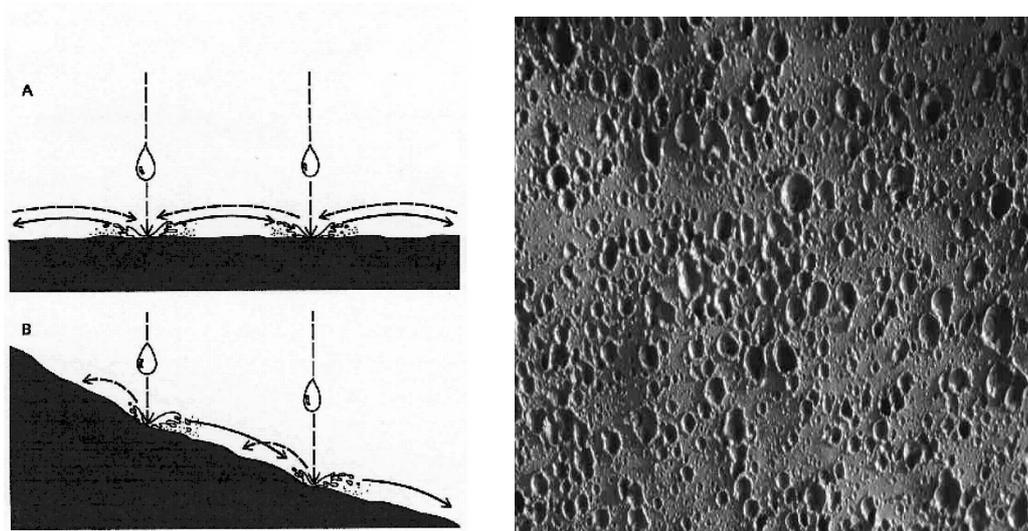
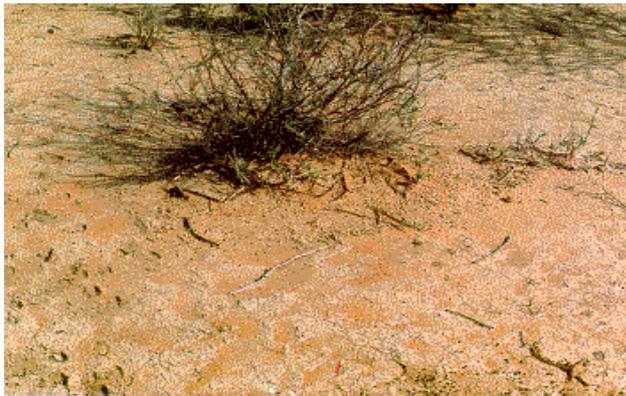


Fig. 1.1 – Effetto delle gocce impattanti sullo strato superficiale del suolo (Fonte: Di Maggio, 2004)

L'erosione areale (*Interrill o Sheet erosion - Fig. 1.2*) è provocata da un deflusso diffuso sul terreno, che si innesca quando questo è superficialmente saturo o prossimo alla saturazione. Il velo idrico che scorre in superficie, asporta le particelle prive di resistenza e va ad alimentare la rete di canali rappresentati dai *rills*. Tale forma erosiva può essere non direttamente visibile e presentarsi unitamente all'erosione da impatto e all'erosione laminare (*sheet erosion*). Quest'ultima è causata dallo scorrimento sulla superficie del terreno di un velo idrico che si muove in regime laminare o turbolento a seconda dei suoi caratteri idrodinamici ed assume velocità e tiranti idrici in relazione alla pendenza e alla scabrezza del versante stesso.



Fonte: <http://www.virtualcentre.org>



Fonte:
http://capella.unine.ch/doityoursoil/demo/e/module3/sequence_10/3120_10_formen_d.html

Fig. 1.2 – Esempi di erosione areale

Nell'*erosione in rivoli* (*Rill erosion* - Fig. 1.3), lo scorrimento superficiale della corrente si concentra lungo direzioni di deflusso preferenziali formando dei veri e propri “solchi” che sono profondi generalmente pochi centimetri e sono eliminabili con le normali tecniche di coltivazione. Il deflusso in questi piccoli canali ha una maggiore energia cinetica e, quindi, una maggiore energia erosiva rispetto al deflusso superficiale dell'erosione di tipo interrill. Il sedimento trasportato dai rivoli proviene sia dall'erosione dei flussi incanalati sia dal trasporto areale. Molto spesso, però, tali forme erosive possono evolvere, associandosi ad altre forme (ad es. quelle di tipo interno) e portare alla formazione di rivoli più grandi (megarill).



Fig. 1.3. – Erosione in rivoli Fonte: http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/Burned_Watersheds/Rll_IntR.jpg

L'erosione incanalata profonda (*Gully erosion* - Fig. 1.4) prevede la formazione di gullies che sono canali di incisione di ampiezza e profondità tali da non poter essere eliminati con normali tecniche di coltivazione. Essi possono derivare dall'allargamento di canali più piccoli (rills) quando il flusso viene concentrato in essi da strutture viarie - quali strade e sentieri - o quando, per un cambio d'uso del suolo a monte di esso, si ha un incremento del deflusso che, incanalandosi, produce una notevole erosione dei terreni poco resistenti.

L'erosione in questi fossi avviene sia per l'energia erosiva della corrente sia per franamento delle sponde. I gullies attivi sono caratterizzati dall'assenza di vegetazione e da pareti ripide.



http://www.geo.uni-frankfurt.de/ipg/ag/ma/bilder/gully_gorom.jpg

Fig. 1.4 – Esempio di gully erosion

Le forme erosive citate sono, di sovente associate tra loro, come mostrato in Fig. 1.5, e sono influenzate da molteplici fattori, tra cui i principali sono:

1) Clima (Climate factor)

- ⇒ Erosività della pioggia;
- ⇒ Distribuzione stagionale della pioggia.

2) Fattori caratteristici del suolo (Soil factor)

- ⇒ Tessitura;
- ⇒ Contenuto in sostanza organica;
- ⇒ Struttura;
- ⇒ Pietrosità.

3) Fattori morfologici

- ⇒ Pendenza del versante;
- ⇒ Lunghezza del versante;
- ⇒ Esposizione.

4) Copertura vegetale (Plant cover).

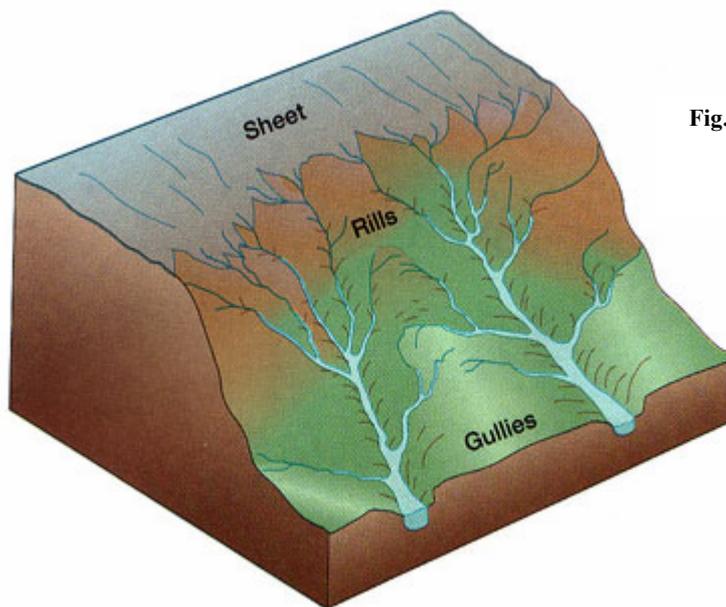


Fig. 1.5 – Esempio di forme erosive in atto su un versante

Fonte:
http://geography.sierra.cc.ca.us/booth/Physical/chp16_fluvial/fluvial1_overl and.htm

Clima: La pioggia è ovviamente identificata come causa principale dell'erosione idrica e la sua capacità di causare erosione - definita *erosività* - è funzione delle caratteristiche fisiche dell'evento meteorico. Fattori quali la quantità di pioggia, la distribuzione delle gocce in relazione alla misura, la velocità terminale e fattori estranei quali la velocità del vento e l'angolo di inclinazione, hanno un certo contributo nella definizione dell'erosività della pioggia.

(Obi & Salako, 1995)

Altri fattori che influenzano l'erosività sono il prodotto tra l'energia cinetica totale dell'evento meteorico (KE) e l'intensità massima in 30 minuti (I_{30} o EI_{30}); ed il prodotto tra la quantità totale dell'evento meteorico (A) e l'intensità massima in 7,5 minuti (I_m o AI_m).

L'energia cinetica della pioggia (KE) può essere calcolata se sono note la massa e la velocità delle gocce; è pertanto necessario conoscere, per il calcolo della massa, la distribuzione delle dimensioni delle gocce di pioggia. A causa della difficoltà di osservazione di questo dato, la quantità di suolo eroso viene collegata all'energia cinetica totale (KE) calcolata a partire dalla distribuzione dedotta della misura delle gocce di pioggia (variabile tra luoghi diversi), oppure dalla relazione tra l'energia cinetica e l'intensità della pioggia.

KE può essere espresso come un flusso, avente come unità di misura $J\ m^{-2}s^{-1}$ (unità di energia per unità d'area e tempo) oppure $Jm^{-2}mm^{-1}$ (unità di energia per unità d'area e di precipitazione).

Hudson chiamò queste due forme, rispettivamente, KE_A e KE_B legate tra loro dall'espressione:

$$KE_B = cKE_A I^{-1}$$

dove c è una costante che permette di adattare l'unità di tempo e I rappresenta l'intensità della pioggia, espressa in mm. Il valore di KE_A è legato ad I da una funzione lineare mentre KE_B è legato ad I da una funzione logaritmica, come funzione esponenziale negativa o come un'equazione di terzo ordine.

Tale formula, rivista da Rosewell per aree diverse, è stata successivamente utilizzata per il calcolo dell'indice di erosività incluso nella RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) di cui si parlerà più in dettaglio nei paragrafi successivi. (*Usòn e Ramos, 2001*)

Nelle aree coltivate, con pendenze inferiori al 10%, l'energia cinetica delle gocce di pioggia è di uno o due ordini di grandezza superiori al *runoff*, e l'impatto delle gocce di pioggia risulta più efficace quando c'è un sottile strato d'acqua sulla superficie del suolo. (*Obi & Salako, 1995*)

Fattori caratteristici del suolo: Per quanto riguarda le caratteristiche intrinseche del suolo, la *tessitura* assume un ruolo fondamentale. Le classi a tessitura fine (argillosa, argilloso-sabbiosa, argilloso-limosa) sono considerate scarsamente erodibili a causa della loro forte coesività. Le classi franco-limosa e limosa sono giudicate, invece, particolarmente erodibili per la loro scarsa coesione e la loro bassa stabilità strutturale. Infine, le classi franco-sabbioso-argillosa, franco-limoso-argillosa, franca, franco-sabbiosa e sabbiosa sono caratterizzate da una moderata resistenza all'erosione in quanto presentano una certa stabilità strutturale e/o una buona permeabilità (*Giorgi, 2005*).

La quantità di *sostanza organica* dei suoli (SOM, Soil Organic Matter) influenza l'erodibilità in quanto migliora la struttura del terreno, la penetrazione delle radici, la capacità di tenuta dell'acqua e l'infiltrazione. *Wischmeier e Smith (1978)* osservarono che l'incremento della sostanza organica dei suoli fa decrescere l'erodibilità. Nella figura 1.6 sono riportate le varie classi tessiturali in relazione al contenuto di sostanza organica e di argilla.

Il ruolo della SOM come agente legante è più importante nei suoli che risultano carenti in altri componenti strutturali; ciò fa sì che l'importanza della SOM decresca con l'aumento del contenuto di argilla. La stabilità strutturale del suolo è comunque migliorata dalla SOM se il rapporto tra SOM e argilla risulta maggiore di 0,07 (*Teklehaimanot, 2003*).

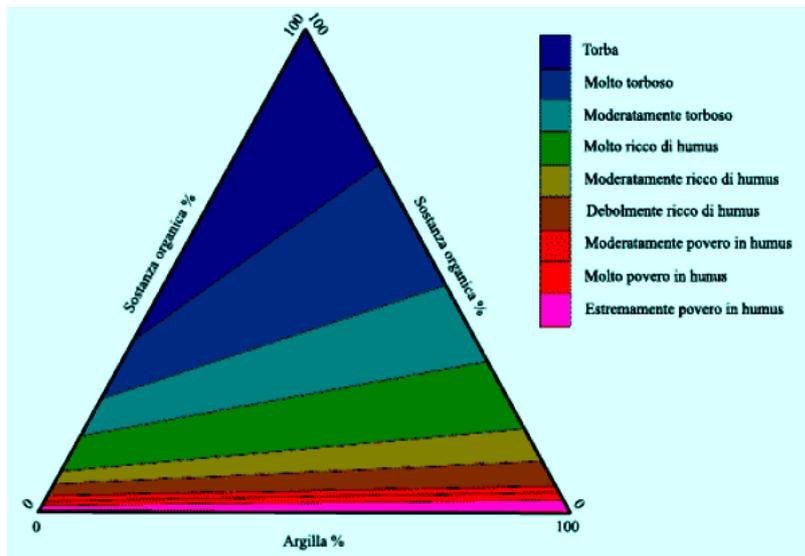


Fig. 1.6 – Classi tessiture del suolo in relazione al contenuto di sostanza organica e di argilla. (Fonte: Giorgi, 2005)

Per *struttura del suolo* si intende la stabilità degli aggregati del suolo. Quest'ultima è migliorata:

- dal contenuto di argilla;
- dal contenuto di sostanza organica;
- dalla presenza di carbonato di calcio e minerali basici come agenti cementanti o agenti leganti;
- dalle radici delle piante;
- dalla capacità di tenuta dell'acqua;
- dalla capacità di infiltrazione.

L'incremento della stabilità degli aggregati del suolo provoca una diminuzione dell'erodibilità, un ritardo nella formazione di uno strato superficiale impermeabile ed un aumento dell'infiltrazione.

Le caratteristiche idrologiche del suolo, in particolare la capacità di infiltrazione e la riserva idrica, influenzando l'intensità del ruscellamento, risultano determinanti nel limitare od incrementare i processi erosivi.

Il *contenuto di umidità del suolo* precedente all'evento piovoso, influenza la produzione del flusso superficiale; infatti il volume di flusso risulta tanto maggiore quanto più il suolo è saturo.

La *pietrosità*, infine, svolge un ruolo di protezione attenuando l'energia cinetica delle piogge.

Fattori morfologici: La suscettività del rilievo all'erosione cresce all'aumentare della *pendenza* e della *lunghezza del versante* inteso come superficie di scorrimento ininterrotta. Questi due fattori agiscono rispettivamente sulla velocità e sulla portata del flusso (*Giorgi, 2005*).

Anche l'*esposizione dei versanti* è considerata un fattore importante per i processi di degrado del territorio, in quanto influenza il microclima attraverso l'angolo e la durata dell'incidenza dei raggi solari sulla superficie del suolo. (*Motroni et al., 2004*)

È dunque un fattore che influisce, in modo indiretto, sul grado di umidità del terreno e quindi sulla capacità di sviluppare e sostenere un'adeguata copertura vegetale che, a sua volta, esercita un'azione di protezione del suolo nei riguardi degli agenti erosivi. (*Sciortino et al., 2000*)

Nell'area mediterranea i suoli esposti a sud ed a ovest sono più caldi in quanto hanno maggiori tassi di esposizione e quindi una minore capacità di immagazzinamento idrico rispetto a quelli esposti a nord e ad est. Di conseguenza, nel primo caso la copertura vegetazionale è più bassa e dunque il tasso di erosione più alto. (*ARPA Basilicata*)

Copertura vegetale: Per *copertura vegetale* del suolo si intende la copertura di piante, pacciami (residui vegetali utilizzati per evitare la crescita di piante infestanti), residui di piante o piante con crescita fitta in diretto contatto con la superficie del suolo. Essa ha un impatto più grande sull'erosione rispetto a qualunque altro singolo fattore (*Teklehaimanot, 2003*); infatti la copertura vegetale intercetta la pioggia battente, impedendo che l'energia della stessa venga trasmessa al terreno. Inoltre, la presenza delle radici facilita l'infiltrazione dell'acqua in profondità nel terreno (*Giorgi, 2005*). A questo proposito, come si evince dal grafico riportato in fig. 1.7, i maggiori livelli di erosione si verificano con valori medi di piovosità (700-1000 mm/anno) (*Cremschi e Rodolfi, 1991*).

Quindi, se da una parte le precipitazioni innescano fenomeni erosivi, dall'altra una buona copertura vegetale li attenua.

Per limitare l'erosione superficiale, quindi, gli interventi sia meccanici che agronomici devono essere volti a proteggere il suolo dall'impatto della pioggia, a favorirne l'infiltrazione dell'acqua e a diminuire la velocità di ruscellamento e del vento.

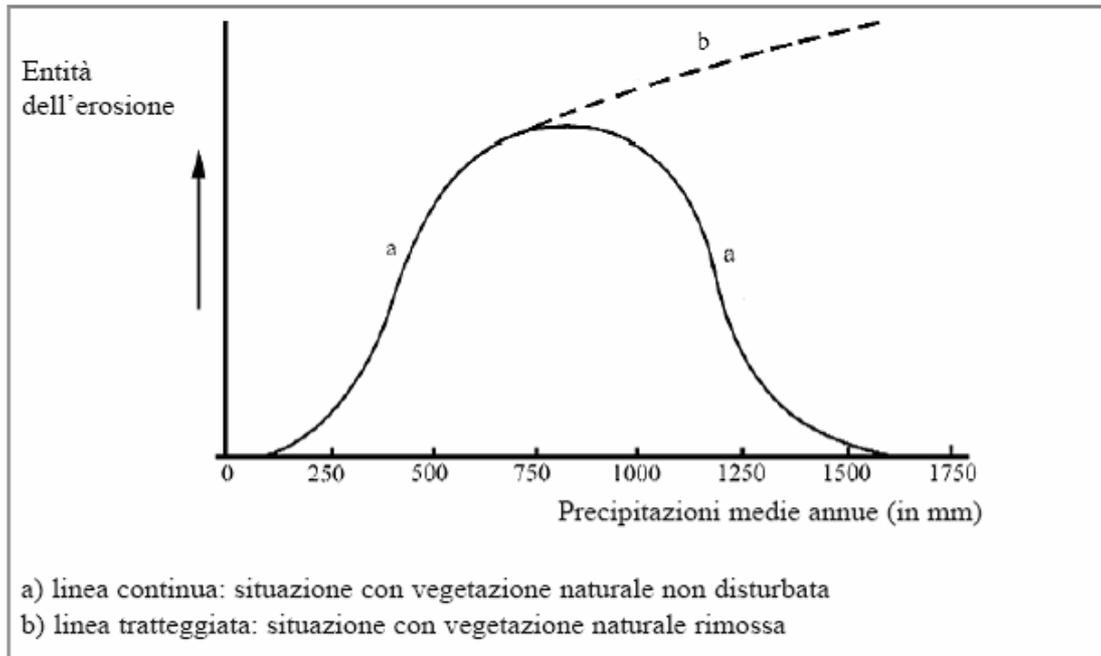


Fig. 1.7: Relazione tra piovosità media annua ed erosione del suolo
(Cremaschi M., Rodolfi G. - "Il suolo", 1991).

I metodi agronomici più comuni consistono nella rotazione delle colture, alternando ad esempio coltivazioni a filari con colture pratensi. È importante, in ogni caso, aggiungere sostanza organica al terreno, che conferisce allo stesso maggiore fertilità e buona struttura (*Giorgi, 2005*).

Par. 1.3. – Modelli per la valutazione dell'erosione del suolo

La diffusione dei sistemi informativi geografici (G.I.S.) ha portato ad un incremento dei metodi per la valutazione dell'erosione del suolo. Questo perché la sempre maggiore accuratezza dei metodi di stima di erosione e trasporto, associato alle capacità di gestione dei dati geografici, consente di sviluppare analisi sempre più accurate sulla distribuzione spaziale e temporale del fenomeno analizzato e di confrontare i risultati ottenuti da modelli diversi con estrema semplicità e leggibilità (*Balacco, 2003*).

I modelli proposti in letteratura per lo studio dei processi erosivi si possono raggruppare in tre categorie:

- i *modelli empirici o concentrati*, che forniscono un approccio quantitativo;
- i *modelli semiempirici o semiquantitativi*;
- i *modelli qualitativi o geomorfologici*.

Nei *modelli empirici o quantitativi* la stima dell'erosione è effettuata applicando un'equazione ricavata empiricamente per sovrapposizione degli effetti.

A questa categoria appartengono le metodologie basate sulla parametrizzazione di vari fattori, che risultano tanto più articolate quanto più elevato è il numero dei fattori e quanto più complessa è la natura di ognuno di essi. Tra tali procedure, una delle più utilizzate è l'*equazione universale per il calcolo della perdita di suolo*, nota come *USLE (Universal Soil Loss Equation)*, ricavata empiricamente sulla base di migliaia di dati sperimentali raccolti dal Servizio di Conservazione del Suolo (SCS, Soil Conservation Service) e dal Servizio di Ricerca in Agricoltura (ARS, Agricultural Research Service) degli Stati Uniti. La relazione di base, formulata in origine da *Wischmeier & Smith (1965, 1978)* è la seguente:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

in cui:

A: Perdita specifica di suolo media annua, espressa in (t/ha anno)

R: Indice di aggressività della pioggia (in MJ mm/ha h anno), che si valuta considerando le altezze di precipitazione non inferiori a 13 mm (in particolare, gli autori indicano come eventi piovosi distinti quelli intervallati da almeno 6 ore di tempo asciutto e tra questi come eventi erosivi quelli aventi un'altezza di pioggia totale non inferiore a 13 mm);

K: Fattore pedologico che esprime l'erodibilità del suolo, in (t h/MJ mm), ricavabile dalle percentuali di materiale fino (<0,1 mm), di materiale grossolano (0,1 - 2 mm), di materia organica, e dalla permeabilità del suolo;

L: Fattore topografico [adimensionale], ricavabile tramite una formula sperimentale, che rappresenta la lunghezza del versante;

S: Fattore topografico [adimensionale], ricavabile tramite una formula sperimentale, che rappresenta la pendenza del versante ;

C: Fattore colturale [adimensionale], legato al tipo di coltivazione e al tipo di copertura vegetale, di non facile valutazione. Per il calcolo di C occorre far riferimento al manuale applicativo dell'USLE che raccoglie i rapporti dimensionali fra la perdita di suolo nelle diverse fasi del ciclo vegetativo delle più differenti colture e quella relativa al maggese di riferimento.

L'uso recente di dati telerilevati e la relativa produzione di carte tematiche di copertura vegetale hanno reso più agevole la determinazione di questo parametro;

P: Fattore di pratica antierosiva, tabellato in funzione del valore della pendenza (s) e del tipo di pratica adottata. In assenza di pratiche antierosive si assume $P = 1$.

In particolare, il prodotto **RK** [t/ha anno] esprime la *potenziale erosione*, dipendente sia dal clima che dal tipo di suolo, che si ha su una parcella "standard" di lunghezza pari a 22,13 m, avente una pendenza del 9%, tenuta permanentemente a maggese, e lavorata a rittochino.

I prodotti **LS** e **CP** sono, invece, dei coefficienti correttivi del prodotto RK che ne amplificano o ne riducono il valore a seconda del discostamento dalle condizioni "standard".

Per quanto concerne i settori di applicabilità della USLE, lo stesso *Wischmeier (1976)* asserisce che detta formula può essere usata convenientemente per:

- stimare la perdita media annua di suolo per erosione di un versante soggetto a specifica utilizzazione;
- suggerire la scelta di sistemi di gestione e di coltivazione, nonché delle opere sistematorie più adatte;
- prevedere le variazioni nelle perdite di suolo a seguito di cambiamenti nei sistemi di agricoltura o delle pratiche conservative;
- determinare le condizioni di applicazione delle pratiche conservative in previsione di una intensificazione delle colture;
- valutare le perdite di suolo derivanti da un'eventuale utilizzazione extra agricola del territorio;

- fornire ai pianificatori i valori delle perdite di suolo da utilizzare nella scelta delle opere sistematorie.

Secondo **Bazzoffi (1984)** il modello di Wischmeier tende a sottostimare la reale erosione, particolarmente dove i processi di erosione incanalata sono secondari o comunque contrastati (per esempio, dalla copertura boschiva) rispetto alle altre forme di erosione. Tuttavia, al modello USLE viene riconosciuta notevole utilità nella stima comparativa del rischio di erosione, cioè nell'individuazione delle variazioni nello spazio e nel tempo dei fattori responsabili del processo erosivo stesso.

Anche se ampiamente applicato, il modello USLE presenta limiti evidenti, riassumibili nella complessità della procedura e nel fatto che i livelli di dettaglio per i vari fattori sono squilibrati, in quanto alcuni possono essere stimati con una buona precisione mentre altri con maggiore approssimazione. Inoltre, i margini di soggettività nella scelta di alcuni fattori sono notevoli ed i numerosi “aggiustamenti” proposti nel tempo hanno contribuito a generare grande incertezza nelle applicazioni pratiche.

Tuttavia la procedura USLE, se correttamente applicata, si rivela uno strumento utile nel fornire informazioni quantitativamente approssimate, circa la diversa propensione all'erosione di aree con diverse caratteristiche climatiche, pedologiche, topografiche e colturali. È da evidenziare, inoltre, che la USLE tiene conto dell'erosione areale ed incanalata e non considera tutti i fenomeni di accumulo e di ritardo nel trasporto dei sedimenti che si verificano lungo un reticolo idrografico. Per tale motivo non può essere utilizzata direttamente per valutare la quantità di materiale solido che transita in un determinato periodo temporale in una sezione di un corso d'acqua.

Partendo dalla sua formulazione originaria, questo modello è stato più volte rivisitato con la definizione di nuovi approcci in grado di interpretare le dipendenze dell'erodibilità del suolo dal clima, dalla topografia, dalle pratiche colturali e dalle opere di sistemazione dei terreni.

Una evoluzione di tale relazione è rappresentata dalla **RUSLE**, proposta in prima versione da Renard nel 1991 (**Renard et al., 1991**) ed attualmente adottata dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti (United States Department of Agriculture, USDA) e dal SCS come strumento ufficiale per la previsione dell'erosione idrica e per la programmazione degli interventi di conservazione del suolo negli ambienti statunitensi. Di tale modello, applicato al bacino del fiume Tusciano, si parlerà in maniera più estesa nel capitolo 4.

Altro modello, anch'esso a base fisica, ampiamente utilizzato è il **WEPP (Water Erosion Prediction Project)** sviluppato dal Dipartimento Agricoltura degli Stati Uniti (USDA) (*Flanagan e Nearing, 1995*). Esso combina processi fisicamente basati a relazioni empiriche ed è applicabile alla scansione temporale sia annuale che del singolo evento piovoso ed a tre diverse scale spaziali che sono:

- scala parcellare o di versante (nella *versione profile*);
- scala di piccolo bacino (nella *versione watershed*)
- scala di maglia quadrata costituenti le unità elementari di applicazione del modello (nella *versione grid*).

Il modello WEPP è strutturato in 7 sezioni:

1. Clima - In questa sezione è possibile ricostruire, per ciascun giorno della simulazione, i principali dati meteorologici (precipitazione, temperatura minima, temperatura massima, radiazione solare) che influenzano il processo erosivo.

2. Infiltrazione - È la componente nella quale viene stimata la quantità di acqua che si infiltra per un dato evento piovoso. Essendo l'infiltrazione ed il deflusso superficiale influenzati dalla conducibilità idraulica del suolo è necessario conoscere anche questo parametro o, in alternativa, la tessitura e la capacità di scambio cationico (CSC) del suolo.

3. Bilancio idrico - In questa sezione del modello vengono stimate le diverse componenti del bilancio idrico: evapotraspirazione, contenuto d'acqua della zona radicale, contenuto di percolazione profonda.

Trattandosi di quantità influenzate principalmente dal clima e dalla copertura vegetale, per la loro determinazione occorre fare riferimento ai dati contenuti nelle sezioni clima e vegetazione.

4. Vegetazione - In questa sezione vengono stimate la fase di crescita e quella di decomposizione dei residui della copertura vegetale, permettendo dunque una stima dell'effetto della vegetazione sui processi di formazione e di trasferimento del deflusso e del carico solido associato. I processi di decomposizione vengono simulati sia per i residui superficiali che per quelli interrati inclusi gli apparati radicali.

5. Deflusso superficiale - Lo schema geometrico adottato prevede la scomposizione del versante in una sequenza di aree omogenee nei riguardi di tutti i fattori del modello in modo che il deflusso e l'erosione prodotti in una generica area si trasferiscano nell'area posta immediatamente a valle lungo la direzione di moto.

6. Erosione – È in questa sezione che vengono calcolati il distacco e il deposito di particelle lungo il profilo suddiviso in tratti di lunghezza dx .

I sedimenti che si staccano dall'area interrill a seguito dell'impatto delle gocce di pioggia vengono trasportati dal flusso superficiale originatosi nel rill e quindi trasportati dalla corrente incanalata o si depositano all'interno del solco.

7. Trasporto nella rete idrografica - Per stimare il trasporto nella rete idrografica bisogna considerare la cosiddetta "capacità di trasporto, T_c " che è stimata con una forma semplificata dell'equazione di **Yalin (1963)**, proposta da **Julien e Simons (1985)**:

$$T_c = K_t \times \tau_s^{3/2}$$

In cui:

T_c = Capacità di trasporto di sedimenti, (in $\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$); K_t = Coefficiente di trasporto dei sedimenti e τ_s = Sforzo di taglio agente sul suolo stimato tramite la relazione:

$$\tau_s = \gamma \times R \times S$$

con:

- γ , peso specifico dell'acqua;
- R , raggio idraulico;
- S , pendenza del versante.

Nel WEPP, quindi, il processo di erosione e di deposito dei sedimenti è modellato da equazioni a chiara connotazione fisica, benché esse siano corrette e validate da coefficienti di derivazione empirico-sperimentale.

Purtroppo, tale modello è poco utile nella soluzione di complessi casi applicativi, come quello proposto in questo lavoro.

Altro modello che permette di prevedere la distribuzione spaziale dei tassi di erosione e di deposito relativamente ad uno stato stazionario di flusso superficiale, caratterizzato da condizioni uniformi di eccesso di pioggia, è l'**USPED** (*Unit Stream Power - based Erosion Deposition*).

Tale modello ipotizza che il processo di erosione sia limitato dalla capacità di trasporto ed è basato sulla teoria della *Unit Stream Power* proposta originariamente da **Moore e Burch (1986)**. Alcuni dei parametri necessari per l'applicazione del modello *USPED* sono utilizzati nelle procedure *USLE* o *RUSLE* e ciò offre l'enorme vantaggio di adoperare parametri che sono stati nel tempo migliorati e resi più affidabili grazie all'ampia diffusione del modello *RUSLE*.

Va osservato, comunque, come tutte le metodologie presentino, pur con complessità diverse,

alcune incertezze legate sia alla difficoltà di definire l'approccio che meglio si adatta alla complessità di un versante e/o di un bacino, sia alla necessità di disporre di una grande quantità di informazioni necessarie a definire l'input del modello (*Vivenzio, 2002*).

I *modelli semiempirici o semiquantitativi* sono modelli semplici e applicabili in casi di particolare complessità climatica o quando sono scarse le informazioni di base concernenti i fattori che determinano il fenomeno erosivo. In questa categoria può essere incluso il **modello P.S.I.A.C.**, messo a punto nel 1968 dal Water Management Subcommittee della U.S. Pacific Southwest InterAgency Committee, che, a differenza della USLE, è particolarmente indicato per le aree caratterizzate da una notevole energia di rilievo e da una densa copertura forestale. Per l'applicazione di tale modello vengono presi in considerazione i seguenti nove fattori:

- a. litologia del substrato;
- b. caratterizzazione del suolo;
- c. caratteristiche climatiche;
- d. regime dei deflussi;
- e. caratteristiche topografiche e/o morfometriche;
- f. copertura vegetale;
- g. uso del suolo;
- h. erosione del suolo;
- i. erosione incanalata e trasporto dei sedimenti.

Ad ogni fattore viene assegnato un valore:

- per i fattori **a, b, c, d** compreso tra 0 e 10;
- per il fattore **e** compreso tra 0 e 20;
- per i fattori **f e g** compreso tra - 10 e + 10 (la copertura vegetale e l'utilizzazione agricola possono ridurre il processo erosivo e, addirittura, causare la rideposizione di sedimenti prodotti in zone più a monte);
- per i fattori **h e i** compreso tra 0 e 25.

Sommando i valori assegnati a ciascun fattore si ricava un valore finale, che può variare tra 0 e 130, tramite il quale avviene la classificazione del bacino.

In letteratura vengono proposte cinque classi, caratterizzate da intervalli di volumi di sedimento (m^3/ha) come riportato nella tabella 1.1.

Tab 1.1.: Classi di erosione netta media annua secondo il modello P.S.I.A.C. (Scesi et al., 2003)

Somma fattori	Classe	Erosione netta annua (m ³ /ha)
>100	1	> 14,29
75-100	2	4,76 – 14,29
50-75	3	2,38 – 4,76
25-50	4	0,95 – 2,38
0-25	5	< 0,95

Il modello si intende correttamente applicato quando la somma dei valori dei fattori compresi tra **a** e **g** è più o meno eguale a quella dei valori dei fattori **h** ed **i**, che vanno quindi valutati per primi. Deve cioè esistere un certo accordo fra cause potenziali di erosione (**a-g**) e gli effetti riscontrabili in sito (**h-i**).

Siccome non sempre i due totali assumono valori simili, si rende spesso necessario procedere a una nuova valutazione dei fattori da **a** a **g**, oppure considerare la differenza come effetto di un processo erosivo “particolare” e puntuale che deve però essere individuato e valutato.

Il punto più delicato nell'applicazione del modello P.S.I.A.C. è l'attribuzione del valore di stima per ciascun fattore in quanto si deve possedere una conoscenza approfondita del ruolo che ciascun fattore svolge nel processo erosivo.

Una guida per l'attribuzione dei valori ai vari coefficienti presenti nel modello è riportata *nell'allegato 1*; in essa vengono suggeriti i valori da attribuire ai nove fattori in relazione ai dati relativi all'area oggetto di studio.

Quando i fattori sono stimati con adeguata accuratezza il modello P.S.I.A.C. si avvicina ai valori reali di perdita del suolo con una maggiore precisione rispetto alla USLE (**Bazzoffi, 1984**).

Un altro modello avente le medesime finalità del P.S.I.A.C., sviluppato dall'omonimo ricercatore slavo nel 1959, è il **metodo di Gravrilovic**. Tale metodo, inizialmente applicato ai corsi d'acqua della Jugoslavia del sud (a carattere torrentizio), è stato applicato, dopo essere stato opportunamente tarato, in Svizzera (**Beyer Portner, 1998**) ed in alcune regioni italiane (**Bazzoffi, 1985**).

Tale modello, che si basa su parametri di tipo geomorfologico, climatico, litologico e vegetazionale, conduce ad una relazione che consente la stima teorica del volume di materiale prodotto per erosione in un bacino idrografico e successivamente, attraverso un coefficiente di

riduzione, la determinazione della quantità di detriti trasportati dai corsi d'acqua alla sezione di chiusura del bacino stesso.

La relazione alla base del modello è la seguente:

$$W = T \times h \times \pi \times \sqrt{Z^3} \times F$$

in cui:

W = Quantità di materiale solido prodotto annualmente per erosione (m³);

T = Coefficiente di temperatura ricavato dalla seguente espressione;

$$T = \sqrt{\left(\frac{t'}{10}\right)} + 0,1 \quad (\text{con } t' = \text{temperatura media annua})$$

h = Precipitazione media annua (mm/anno);

F = Superficie del bacino (Km²);

Z = Coefficiente di erosione relativa (in m² Km^{-4/3} mm^{-2/3}) determinato dalla relazione:

$$Z = X \times Y \times (G + \sqrt{I})$$

con:

X = Coefficiente di protezione del suolo da parte della vegetazione;

Y = Coefficiente di erodibilità del suolo in funzione della litologia;

G = Coefficiente che esprime il grado e la tipologia dei processi erosivi;

I = pendenza media % del bacino **(Scesi et al., 2003)**.

Nell'**allegato 2** sono riportati i valori dei coefficienti citati da applicare ai vari sottobacini aventi caratteristiche litologiche, vegetazionali e geomorfologiche omogenee, nei quali è suddiviso il bacino idrografico principale.

Per ottenere il volume medio lordo trasportato fino alla sezione di chiusura del bacino, è stato necessario moltiplicare W per il fattore di riduzione R, ricavato dalla relazione:

$$R = \sqrt{OD} \times \frac{(L + LI)}{(L + 10) \times F}$$

con:

O = perimetro del bacino (Km);

D = Altezza media, espressa mediante la curva ipsometrica (Km);

F = Superficie del bacino (Km²);

L = Lunghezza dell'asta principale (Km);

LI = Lunghezza complessiva dei corsi d'acqua secondari (Km).

Il modello di Gavrilovic dunque, calcola la velocità di perdita di suolo usando caratteristiche morfometriche del bacino come il perimetro, la lunghezza delle aste fluviali, l'altitudine media e la superficie del bacino ed utilizza un approccio a punti solo per le tre variabili descrittive (copertura del suolo, erodibilità del suolo, grado e tipologia del processo erosivo), mentre le altre variabili citate sono dei descrittori quantitativi delle condizioni del bacino (*de Vente e Poesen, 2005*).

L'applicazione di tale metodo al bacino del fiume Tusciano, riportata in un lavoro del 2003, ha portato ad una stima di sedimento prodotto per erosione pari a circa 104.000 m³/anno (*Luciano, 2003*).

Nei *modelli qualitativi o geomorfologici* rientrano quelle metodologie basate sull'osservazione diretta dei fenomeni di degradazione del suolo, come le tecniche di telerilevamento e fotointerpretazione, e sulla costruzione di carte geomorfologiche, che permettono di analizzare le forme di erosione e di accumulo prodotte da processi morfogenetici particolari.

Questo approccio consente di definire le diverse classi di rischio, permettendo la comparazione tra diversi contesti areali, ma non fornisce indicazioni dirette sulla quantità per ettaro per anno di suolo asportato.

L.A. Manrique (1988) ha proposto un modello semplificato che può essere utilizzato per una stima orientativa del rischio potenziale di erosione. In particolare, Manrique valuta il rischio di erosione in base alla combinazione delle classi dei seguenti tre fattori:

☛ **erosività delle piogge (R)**: è valutata tramite l'indice di Fournier modificato (IF), calcolato nel modo seguente:

$$IF = \sum_1^{12} \frac{p^2}{P}$$

in cui: p = precipitazione media mensile e P = totale della precipitazione annua, entrambi espresse in mm.

In base ai valori dell'indice di Fournier modificato, l'autore distingue cinque classi di erosività della pioggia, riportate nella tabella 1.2:

Tab. 1.2 – Classi di erosività (IF) secondo il modello Manrique	
Molto bassa (R1)	IF < 50
Bassa (R2)	50 < IF < 100
Moderata (R3)	100 < IF < 200
Alta (R4)	200 < IF < 300
Molto alta (R5)	IF > 300

☛ **erodibilità del suolo (K)**: è calcolata per mezzo di abachi, a partire dai valori percentuali di sabbia, limo, sabbia molto fine e sostanza organica. Dei valori di K più precisi possono essere ricavati conoscendo le caratteristiche di permeabilità e di struttura. In questo caso vengono distinte sei classi di erodibilità del suolo, come indicato nella tabella 1.3:

Tab. 1.3 – Classi di erodibilità del suolo (K) secondo il modello Manrique	
Molto bassa (K1)	$K < 0,1$
Bassa (K2)	$0,1 < K < 0,2$
Moderata (K3)	$0,2 < K < 0,3$
Moderatamente alta (K4)	$0,3 < K < 0,4$
Alta (K5)	$0,4 < K < 0,5$
Molto alta (K6)	$K > 0,5$

☛ **fattore topografico (LS)**: viene valutato mediante un apposito diagramma che permette di leggerne il valore in base alla lunghezza ed alla pendenza media del versante. Il fattore prevede quattro classi, riportate nella tabella 1.4:

Tab. 1.4 – Classi di valore del fattore topografico (LS) secondo il modello Manrique	
Bassa (S1)	$LS < 2$
Moderata (S2)	$2 < LS < 4$
Alta (S3)	$4 < LS < 6$
Molto alta (S4)	$LS > 6$

Le combinazioni delle classi dei tre fattori sopra elencati possono essere al massimo 111. Un'analisi di queste classi ha condotto l'Autore a riunirle in 5 gruppi, cui corrisponde un rischio di erosione crescente, come riportato in tabella 1.5:

Tab. 1.5 – Raggruppamento in classi per la determinazione del rischio secondo il modello di Manrique.				
Rischio (E)	Caratteristiche	Fattore topografico	Erosività delle piogge	Erodibilità del suolo
Basso (E1)	Aree altamente idonee all'utilizzo agricolo che richiedono pratiche di conservazione minime	S1	R1 - R3	K1 - K3
Moderato (E2)	Aree adatte all'utilizzo agricolo ma che richiedono moderate pratiche di conservazione	S1	R4 - R5	K4 - K6
		S2	R1 - R3	K1 - K3
Alto (E3)	Aree che possono essere utilizzate solo mettendo in atto speciali pratiche di conservazione	S1	R4 - R5	K4 - K6
		S2	R4 - R5	K1 - K3
		S3	R1 - R3	K4 - K6
Molto alto (E4)	Aree nelle quali l'utilizzo agricolo comporta un rischio di erosione del suolo molto elevato	S2	R4 - R5	K4 - K6
		S3	R4 - R5	K1 - K3
		S3	R1 - R3	K4 - K6
		S4	R1 - R3	K1 - K3
Estremamente alto (E5)	Aree tendenzialmente non adatte ad alcun tipo di utilizzo produttivo	S3	R4 - R5	K4 - K6
		S4	R4 - R5	K1 - K6

Tra i modelli qualitativi possono essere inseriti anche quei modelli che permettono di calcolare il trasporto torbido in un dato bacino, tramite alcuni parametri geomorfici. Essi, pertanto, sono in grado di fornire valide indicazioni quantitative indirette sull'entità dei processi erosivi.

Un parametro geomorfometrico particolarmente adatto a misurare l'intensità dei processi erosivi è dato dal *rapporto di rilievo*, ottenuto dal rapporto fra la massima differenza di quota nel bacino e la lunghezza dello stesso, misurata parallelamente all'asta principale.

L'ottima correlazione che esiste tra il *rapporto di rilievo* da un lato e le caratteristiche litologiche e la produzione di sedimenti dei bacini dall'altro, è stata individuata (**Schumm, 1956**) usando i dati sotto forma di grafico di un gruppo di piccoli bacini del Colorado.

Fournier (1960) propone la relazione:

$$\log D_S = 2,65 \log \frac{p^2}{P} + 0,461 \log \frac{H^2}{S} - 1,56 \quad [a]$$

in cui:

- D_S , trasporto torbido espresso in tonnellate/Km²/anno;
- p , quantità di precipitazione del mese più piovoso (mm);
- P , quantità di precipitazione totale annua (in mm);
- H , altitudine media del bacino (in m);
- S , superficie del bacino (in Km²).

La relazione proposta da Fournier, sulla base dei dati di 96 bacini appartenenti a differenti siti del globo terrestre, tiene conto sia del regime delle precipitazioni che della situazione orografica. L'autore desume l'entità dell'erosione a partire dal trasporto torbido, permettendo così di costruire una possibile mappa dell'erosione a scala mondiale.

Con riferimento al territorio italiano, **Gazzolo & Bassi (1961)** hanno proposto una classificazione dei terreni in base al grado di erodibilità. Quindi, con riferimento ai sedimenti erosi che producono trasporto torbido ed in base ai dati di 70 stazioni torbidimetriche, propongono una mappa ad isolinee ad eguale erosione media.

Successivamente gli stessi Autori (1964) prendono in considerazione i rapporti fra il trasporto torbido e le condizioni fisiografiche maggiormente influenti sui processi erosivi. Fra le grandezze considerate sono presenti sia quelle di origine quantitativa (precipitazioni, pendenza dell'asta fluviale, ecc.) sia di origine qualitativa (copertura boschiva, un fattore geologico e il grado di erodibilità). Risulta dunque molto alto il grado di soggettività insito nelle valutazioni.

Il metodo maggiormente utilizzato per la stima del trasporto torbido di bacini idrografici, anche in assenza di stazioni torbidimetriche, è quello proposto da *Ciccacci et al. (1980)*. Tale metodo, che sarà applicato anche al bacino oggetto del nostro studio, sarà ampiamente descritto nel capitolo 5.

Infine sono da ricordare anche le sperimentazioni con piogge simulate su parcelle attrezzate all'interno di piccoli bacini. Tale metodologia permette di studiare ed analizzare i diversi fattori coinvolti nei processi erosivi sia separatamente che globalmente in condizioni controllate e confrontabili, ottenendo così una più rapida conoscenza del fenomeno erosivo rispetto alle indagini effettuate con pioggia naturale.

CAPITOLO 2: IL BACINO PILOTA

Par. 2.1. – Inquadramento dell'area di studio

Il bacino del fiume Tusciano, appartenente al territorio di competenza dell'Autorità di Bacino in Destra Sele, è caratterizzato da un'estensione territoriale di circa 260 km² e da una lunghezza dell'asta principale di circa 37 km (Fig. 2.1).

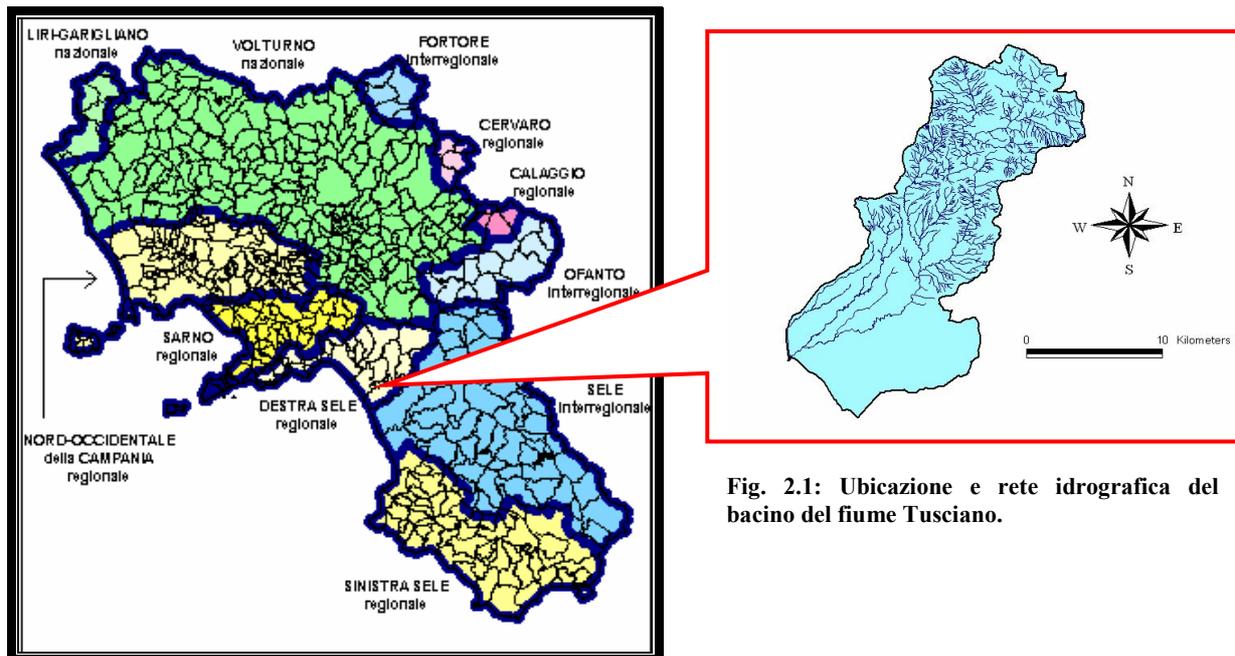


Fig. 2.1: Ubicazione e rete idrografica del bacino del fiume Tusciano.

La zona valliva del bacino fa parte dell'estesa pianura alluvionale del fiume Sele (di estensione superiore ai 500 km²) caratterizzata, in linea generale, da una notevole antropizzazione e, quindi da significativi fattori di rischio, dovuti sia all'intensa attività agricola che all'abusivismo edilizio civile ed industriale, purtroppo diffuso in tale area. Tale zona è, infatti, caratterizzata da insediamenti abitativi di notevole importanza (Battipaglia), da un'agricoltura irrigua intensiva (con conseguente largo uso di fertilizzanti, fitofarmaci e pesticidi, con presenza di serre ed impianti specializzati), da numerosi ed attivi insediamenti industriali (in particolare caseifici) e da allevamenti di un certo interesse economico (*Giugni et al, 2002*).

La parte montana del bacino è caratterizzata da massicci carbonatici e presenta versanti ad elevata pendenza, un'utilizzazione del suolo più varia ed una densità abitativa molto più ridotta, con maggiore presenza di colture estensive (prevalenza di seminativi non irrigui, colture arboree, pascoli, prati naturali, boschi, macchia). Nella parte pedemontana, si rinven- gono

affioramenti argillosi, caratterizzati da pendenze meno acclivi e dalla presenza di centri abitati e colture più o meno estese.

I suoli sono prevalentemente argillosi (o comunque con elevato contenuto di argilla) nella parte centrale e valliva del bacino, mentre nella parte alta le rocce, prevalentemente carbonatiche, sono generalmente ricoperte da coltri piroclastiche che raggiungono spessori anche di alcuni metri, con componente argilloso-limosa ben rappresentata. Il livello della falda, che si presenta quasi ovunque come falda libera, oscilla tra 0 e 10 m s.l.m. nella fascia litoranea, tra 10 e 16 m s.l.m. nella parte centrale del bacino, mentre nella parte alta supera i 30 m s.l.m. (e spesso i 60 m s.l.m.).

Il regime di umidità del suolo è di tipo “xerico”, con piovosità accentuata ed in eccesso nei periodi autunno - inverno - primavera, e con deficit di piovosità e di disponibilità idrica per il normale sviluppo delle piante coltivate nel periodo estivo (*Giugni et al, 2002*).

Par. 2.2. - Caratterizzazione climatica del territorio

Lo studio della dinamica dell'acqua negli orizzonti o negli strati superficiali del suolo è di notevole importanza essendo tra l'altro legato all'origine dei fenomeni d'inquinamento che interessano le falde sotterranee.

Il suolo, infatti, è sede di flussi idrici, che provengono dall'atmosfera e si muovono verso il sottosuolo e/o ritornano all'atmosfera.

Non tutta l'acqua che attraversa il suolo viene ceduta o restituita: il suolo ha la capacità di trattenerne delle aliquote, la cui entità dipende innanzitutto dalla natura del suolo stesso e poi dall'entità delle forze che gli contendono l'acqua: gravitazione, suzione radicale, evapotraspirazione.

Le quantità di acqua in gioco variano significativamente con la latitudine e le stagioni. Piovosità ed evapotraspirazione sono fortemente dipendenti da molteplici fattori ambientali per una data latitudine: posizione geografica, quota, esposizione, ventosità, insolazione, copertura vegetale e, infine, l'intervento antropico che modifica ed influenza i caratteri fisici e biochimici degli orizzonti superficiali del suolo, variando fortemente quantità e qualità della copertura vegetale, apportando direttamente acqua con l'irrigazione ed asportandone con i raccolti.

Par. 2.2.1. - Piovosità

In Italia esistono diverse istituzioni e servizi che gestiscono reti di rilevamento atmosferico. È possibile, quindi, disporre sia di dati relativi ai singoli eventi meteorici che di dati medi relativi a lunghi periodi di rilevazione.

Le istituzioni più importanti e diffuse sul territorio nazionale, che sistematicamente rilevano, elaborano e pubblicano i dati meteorologici, sono: il ***Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN)*** fino all'anno 1999 poi diventato parte della Protezione Civile, l'***Ufficio Centrale di Ecologia Agraria (UCEA)*** del Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali ed il ***Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare***. A livello locale, invece, si può fare riferimento alla ***Rete Agrometeorologica Regionale (R.A.R.)***.

Nell'ambito dello studio effettuato per il bacino pilota, si è fatto riferimento agli ***Annali Idrologici*** pubblicati dall'Ufficio Idrografico e Mareografico di Napoli a partire dalla prima metà del 1900 fino al 1999, per i dati di piovosità massima oraria, piovosità massima giornaliera, piovosità media mensile e piovosità media annua, ed ai dati di piovosità giornaliera

dal 1999 al 2003 rilevati alla stazione di Battipaglia della Rete Agrometeorologica Regionale e pubblicati sul sito internet dell'Assessorato Agricoltura, Servizio Agrometeorologico della *Regione Campania*.

Nella fig. 2.2 sono state anzitutto riportate le stazioni pluviometriche che ricadono all'interno o in prossimità del bacino pilota per le quali si dispone di un numero di dati di piovosità superiore a 15 anni.

In particolare, quindi, per il periodo 1959-2004, si è fatto riferimento alle seguenti stazioni:

- Acerno, 724 m s.l.m., 26 anni di dati rilevati con pluviometro registratore;
- Pontecagnano, 31 m s.l.m., 22 anni di dati rilevati con pluviometro comune;
- Eboli, 170 m s.l.m., 24 anni di dati rilevati con pluviometro registratore;
- Battipaglia, 72 m s.l.m., 33 anni di dati rilevati con pluviometro comune;
- Giffoni Valle Piana, 192 m s.l.m., 40 anni di dati rilevati con pluviometro registratore;
- Campagna, 299 m s.l.m., 24 anni di dati rilevati con pluviometro registratore;
- Pontecagnano A.M., 34 m s.l.m., 22 anni di dati rilevati con pluviometro registratore.

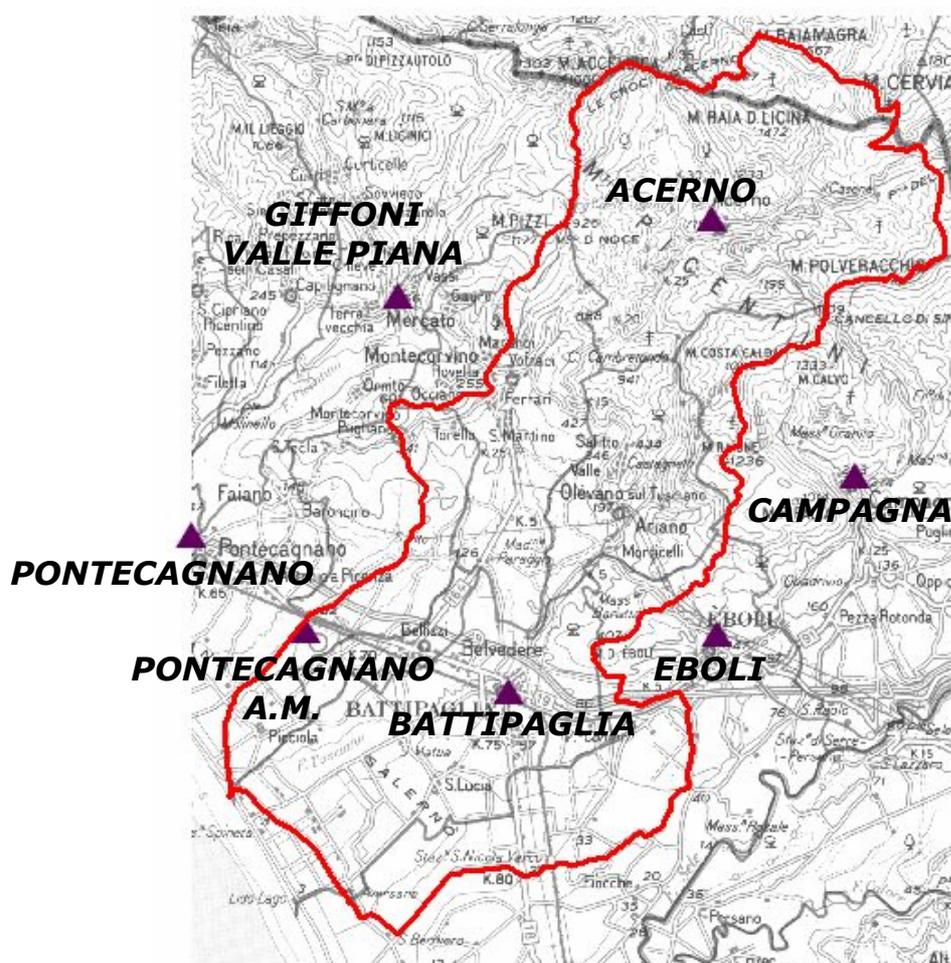


Fig. 2.2 – Localizzazione delle stazioni pluviometriche.

Nell'allegato 3, per le sette stazioni indicate, sono stati riportati i seguenti dati pluviometrici:

- valori medi mensili di precipitazione (in mm);
- valori medi mensili del numero di giorni piovosi;
- valori medi mensili della densità di precipitazione (in mm/g).

I dati raccolti sono stati, inoltre, elaborati in base alla stagionalità (cfr. allegato 4).

In base ai dati raccolti ed alle successive elaborazioni, è stato possibile effettuare le seguenti considerazioni:

- ✓ il regime di umidità del suolo, nell'area del bacino e nelle aree immediatamente limitrofe, è di tipo "xerico", con piovosità accentuata ed in eccesso nei periodi autunno-inverno-primavera, e con deficit di piovosità e di disponibilità di acqua per il normale sviluppo delle piante coltivate nel periodo estivo;
- ✓ il valore dell'altezza di pioggia media annua per tutte le stazioni considerate è superiore a 1000 mm pioggia/anno. Ciò evidenzia che la zona è soggetta ad una piovosità alquanto elevata;
- ✓ la piovosità concentrata in inverno determina, in questo periodo dell'anno, condizioni che possono favorire la percolazione in profondità attraverso gli strati del suolo; tuttavia il deficit di disponibilità per le piante e la forte evapotraspirazione estiva non fanno escludere, in linea teorica, la possibilità di brevi periodi di lisciviazione, da verificare caso per caso;
- ✓ nella parte montana, costituita dalle propaggini appenniniche, dove nascono e si alimentano i primi tratti dei corsi d'acqua che attraversano la pianura sottostante, i valori della piovosità media annuale, rispetto all'area valliva, risultano più alti mentre più bassi sono i valori dell'evapotraspirazione (*Giugni et al., 2002*).

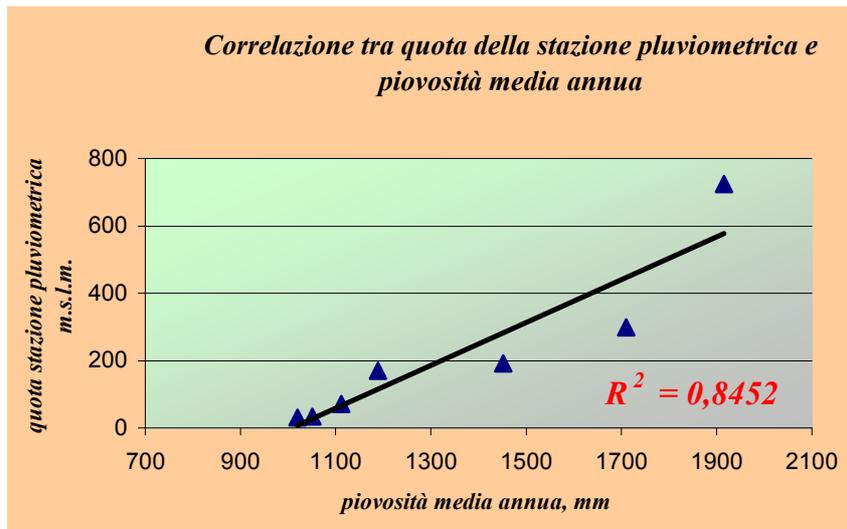


Fig. 2.3: Andamento della piovosità media annua in funzione della quota altimetrica delle stazioni pluviometriche

In fig. 2.3 è stato riportato l'andamento della piovosità media annua (P_m) in funzione della quota delle stazioni pluviometriche (z), espresso dalla relazione:

$$P_m = 1,3271 z + 1061,4$$

Il valore di R^2 mostra una buona correlazione tra la quota della stazione pluviometrica ed il dato di piovosità media annua per la stazione stessa. Il valore massimo nel caso del bacino pilota si raggiunge per la stazione di Acerno, sita nella parte montana del bacino.

Per le aree montane carbonatiche, inoltre, è necessario considerare che, nei periodi piovosi, le acque al netto di un limitato fenomeno evapotraspirativo, sono soggette in parte a ruscellamento superficiale ed in parte a infiltrazione nelle vie carsiche preferenziali (inghiottitoi e canali carsici).

In questi casi è più difficile prevedere il carico di soluti di cui le acque possono arricchirsi (generalmente basso per la rapidità del fenomeno infiltrativo), oltre al carico di materiali solidi mobilizzati e trasportati dalle acque dilavanti.

Par. 2.2.2. - Termometria

A differenza delle stazioni pluviometriche, che risultano distribuite in modo abbastanza uniforme all'interno del bacino del Tusciano, le stazioni per i rilievi termometrici sono poco numerose; infatti, mentre nella parte valliva sono presenti tre stazioni (per le quali sono a disposizione serie limitate di dati storici), e precisamente:

- * Battipaglia;
- * Eboli;
- * Pontecagnano A.M.

nella parte montana del bacino non è presente alcuna stazione.

Facendo riferimento allo stesso periodo dei dati pluviometrici (1959-2004), sono stati raccolti per Eboli 20 anni di dati, per Battipaglia 24 anni di dati ed infine per Pontecagnano 18 anni di dati.

I dati termometrici relativi agli anni dal 1959 al 1999 sono stati tratti dagli Annali Idrologici pubblicati dall'Ufficio Idrografico e Mareografico di Napoli mentre i dati relativi agli anni dal 1999 al 2004 sono stati rilevati per la stazione di Battipaglia dalla Rete Agrometeorologica Regionale (R.A.R.), e per la stazione di Pontecagnano dal bollettino dell'Ufficio Centrale di Ecologia Agraria (UCEA) del Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali.

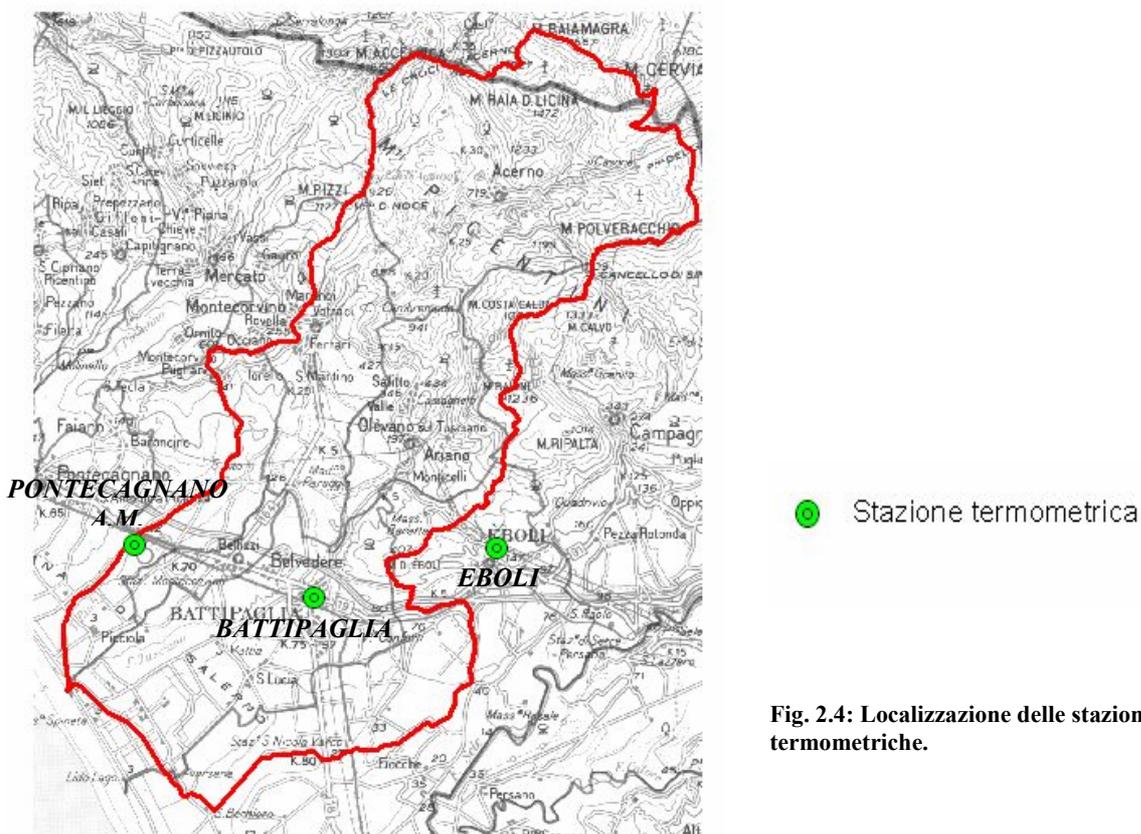


Fig. 2.4: Localizzazione delle stazione termometriche.

Nell'allegato 5 sono state riportate, per ogni stazione, le temperature massime, minime e medie mensili per gli anni disponibili e le escursioni termiche medie mensili.

I dati raccolti sono stati, anche in questo caso elaborati in base alla stagionalità per ciascuna stazione. I grafici ottenuti sono riportati in fig. 2.5.

Come si può facilmente osservare, l'andamento stagionale è praticamente lo stesso per le tre stazioni e, considerato che *in Italia meridionale, le temperature sono fortemente correlate con*

la quota altimetrica con un gradiente di circa $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ogni 100 m (Ducci, 1999) non deve preoccupare la mancanza di stazioni termometriche nel bacino. Per questo motivo, per poter effettuare una correlazione tra la quota altimetrica della stazione e la temperatura media annua, sono state considerate delle stazioni termometriche “ausiliarie” che ricadono in territorio campano ma sono posizionate a quote altimetriche diverse da quelle indicate per il bacino del Tusciano (Corniello et al., 2005).

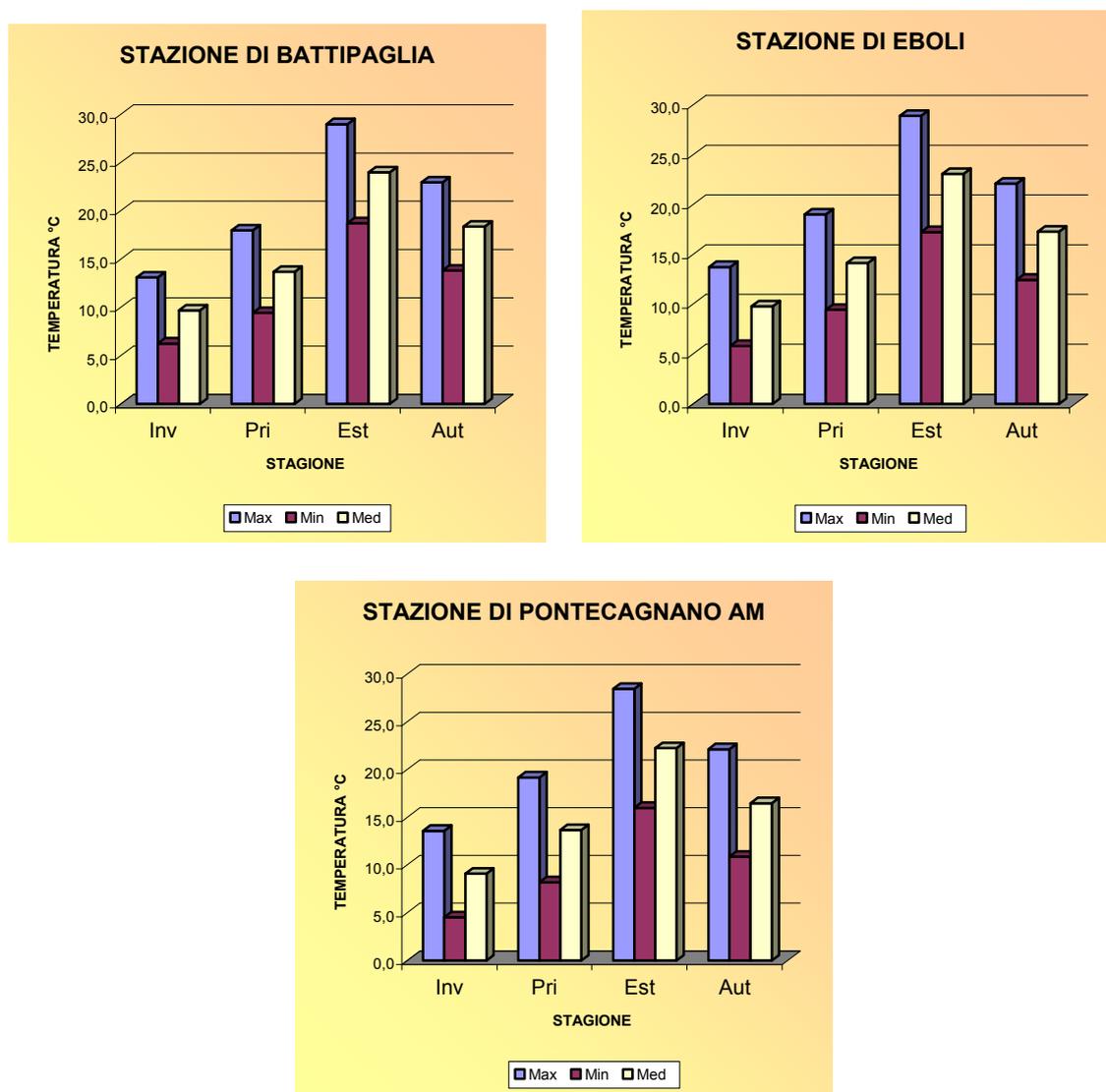


Fig. 2.5: Andamento stagionale delle temperature massime, medie e minime per ogni stazione termometrica

L'indicazione delle “stazioni ausiliare” utilizzate, con le relative quote altimetriche, sono state sintetizzate nella tabella 2.1.

Le stazioni evidenziate in giallo sono quelle già citate ricadenti nel bacino o posizionate nelle immediate vicinanze.

Stazione	Quota (m s.l.m.)	Temperatura media (°C)
Salerno	30	17,8
Pontecagnano A.M.	36	15,4
Battipaglia	72	16,5
Eboli	170	16,2
Casalvelino	189	17,2
Morigerati	286	16,1
Capaccio	430	15,1
Montevergine	1287	8,3

Tab. 2.1: Stazioni termometriche campane con indicazione della quota (in m s.l.m.) e temperatura media annua (in °C).
Periodo di riferimento 1951-1999

In base ai dati raccolti, è stato possibile ricavare la correlazione tra la temperatura media annua (T_m) e la quota altimetrica della stazione termometrica (z), riportata in fig. 2.6.

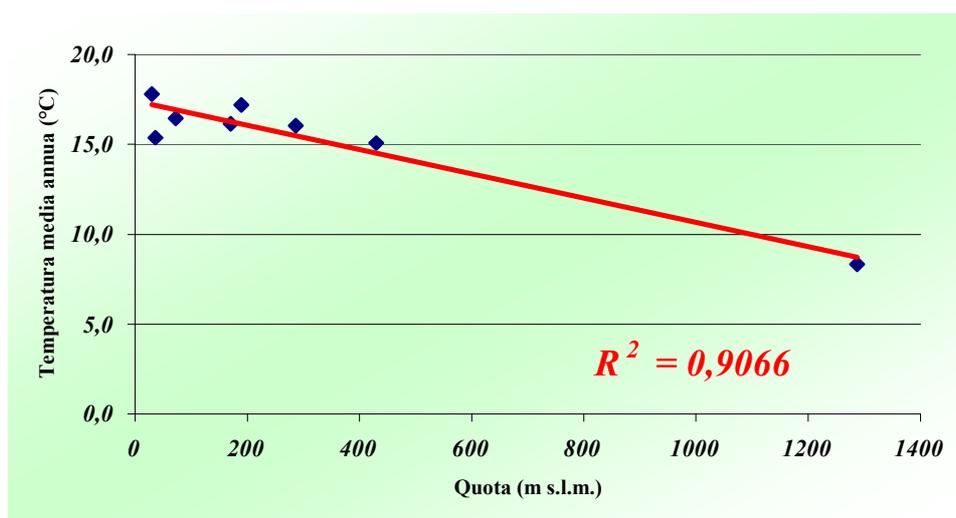


Fig. 2.6 – Temperatura media annua (°C) in funzione della quota altimetrica delle stazioni termometriche (m s.l.m.)

Il valore del coefficiente R^2 ottenuto indica l'ottima correlazione esistente tra i due parametri; pertanto l'equazione che permette di ricavare la temperatura media annua in funzione della quota altimetrica è la seguente:

$$T_m (\text{°C}) = -0,0067 z + 17,413$$

In cui: T_m = temperatura media annua (°C) e z = quota altimetrica (m s.l.m.)

L'equazione ottenuta, unitamente al modello digitale del terreno del bacino del Tusciano, ha permesso di ricavare la temperatura media dell'intero bacino. Il risultato ottenuto è stato riportato in fig. 2.7.

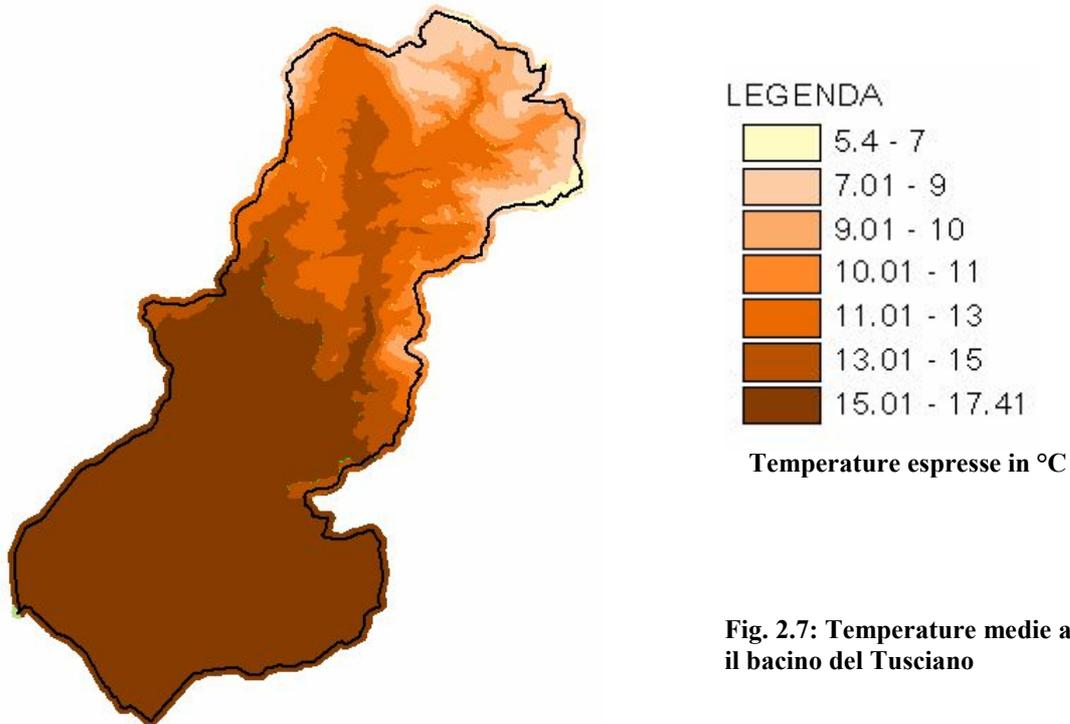


Fig. 2.7: Temperature medie annue per il bacino del Tusciano

Dall'elaborazione effettuata si ricava che la temperatura media annua per l'intero bacino è pari a **14,3 °C**, con un valore minimo di 5,4 °C nella zona montana e un valore massimo di 17,4 °C nella zona valliva.

Par. 2.3. – Caratteristiche morfologiche e uso del suolo

Il bacino del Fiume Tusciano si estende per circa 260 Km² e comprende al suo interno dieci comuni: Acerno (SA), Bagnoli Irpino (AV), Battipaglia (SA), Bellizzi (SA), Campagna (SA), Eboli (SA), Montecorvino Rovella (SA), Montecorvino Pugliano (SA), Olevano sul Tusciano (SA) e Pontecagnano Faiano (SA). Di tali comuni, alcuni ricadono per la totalità all'interno del bacino mentre altri ne fanno parte solo parzialmente. Nella tab. 2.2. è indicata l'estensione territoriale totale di ciascun comune e la popolazione residente (*ISTAT, 2004*).

Comune	Popolazione residente (n. ab)	Estensione territoriale (Km ²)
Acerno	2943	72,54
Bagnoli Irpino	3368	67,03
Battipaglia	50791	56,31
Bellizzi	12683	7,97
Campagna	15603	135,11
Eboli	36234	137,02
Montecorvino Rovella	11967	42,08
Montecorvino Pugliano	8726	28,75
Olevano Sul Tusciano	6577	26,36
Pontecagnano Faiano	23227	36,94

Tab. 2.2. – Comuni facenti parte del bacino del fiume Tusciano con relativa popolazione residente ed estensione territoriale. Fonte ISTAT

Nella figura 2.8, invece, è riportata la copertura comunale percentuale del bacino pilota. Dal grafico è possibile notare che due comuni ricoprono quasi il 50% del territorio del bacino, Acerno (27%) e Battipaglia (20%): il primo rappresenta l'unico centro abitato di una certa rilevanza della parte montana del bacino, mentre il secondo si estende nella parte valliva ed è caratterizzato da un elevato numero di aziende agricole e caseifici.

Da un punto di vista morfometrico, il bacino raggiunge la massima quota di 1788 m s.l.m. nella parte montana, mentre la parte valliva è praticamente a livello del mare. La quota media del bacino è di 433 m s.l.m.

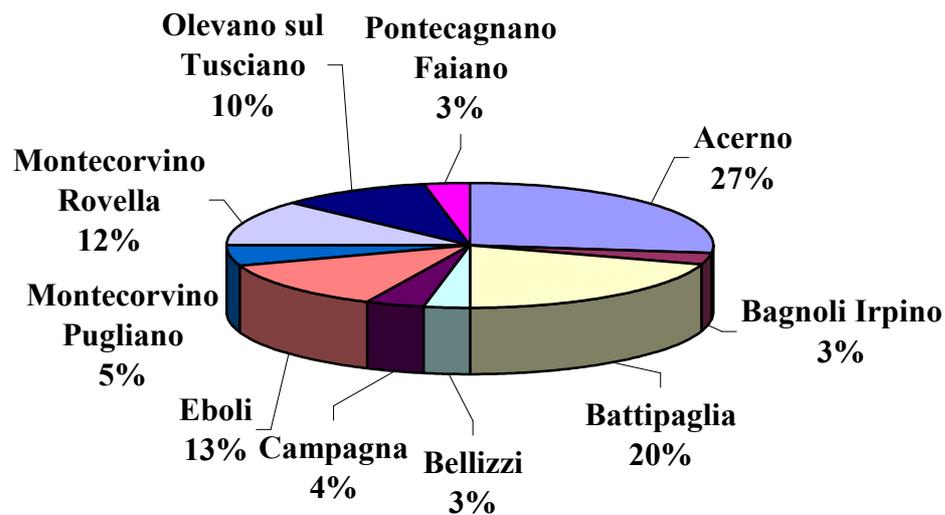


Fig. 2.8 – Copertura comunale percentuale del bacino.

Per avere un quadro generale delle principali attività umane ed economiche che insistono sul territorio, la cui analisi può non solo offrire uno “stato” sull’utilizzo delle risorse ambientali ma anche rappresentare la “pressione” che le attività antropiche esercitano sulle risorse stesse, è necessario conoscere l’uso del suolo.

Da una sua analisi, infatti, è possibile evidenziare quanta parte del territorio è occupata da urbanizzazione e infrastrutture, che rappresentano la principale forma di perdita irreversibile di suolo; oppure descrivere la diffusione di siti estrattivi o ancora ottenere informazioni sulla quantità di suolo che viene sottratta all’attività agricola (*D’Antonio & Ingenito, 2003*).

Per ottenere le informazioni su citate, per il bacino pilota, (cfr. fig. 2.9) si è fatto riferimento al programma Corine (Coordination of Information on the Environment) che è stato istituito, a livello comunitario, nel 1985 con lo scopo di raccogliere, coordinare e garantire l’uniformità dei dati sullo stato dell’ambiente nell’intera Europa. Il programma ha realizzato un riferimento cartografico comune (Land Cover Map) basato sull’interpretazione di immagini da satellite Landsat (*Fonte SINANET APAT*).

Il Programma CORINE, oltre a raccogliere i dati geografici di base in forma armonizzata (coste, limiti amministrativi nazionali, industrie, reti di trasporto ecc.), prevede l’analisi dei più importanti parametri ambientali, quali la copertura e l’uso del suolo (CORINE Land Cover, CLC), le emissioni in atmosfera (CORINE Air), la definizione e l’estensione degli ambienti

naturali (CORINE Biotopes) e la mappatura del rischio di erosione dei suoli (CORINE Erosion).

Il sistema informativo geografico si compone di 44 classi di copertura del suolo suddivise in 3 livelli (5 classi per il primo livello, 15 per il secondo livello e 44 per il terzo). La prima realizzazione è stata condotta a partire dagli anni '80 e ha portato alla realizzazione del CLC 90. Attualmente è disponibile per il CORINE la versione 2000 (CLC00) che è stata utilizzata per l'estrapolazione della copertura del suolo del bacino del Tusciano riportata in fig. 2.9:

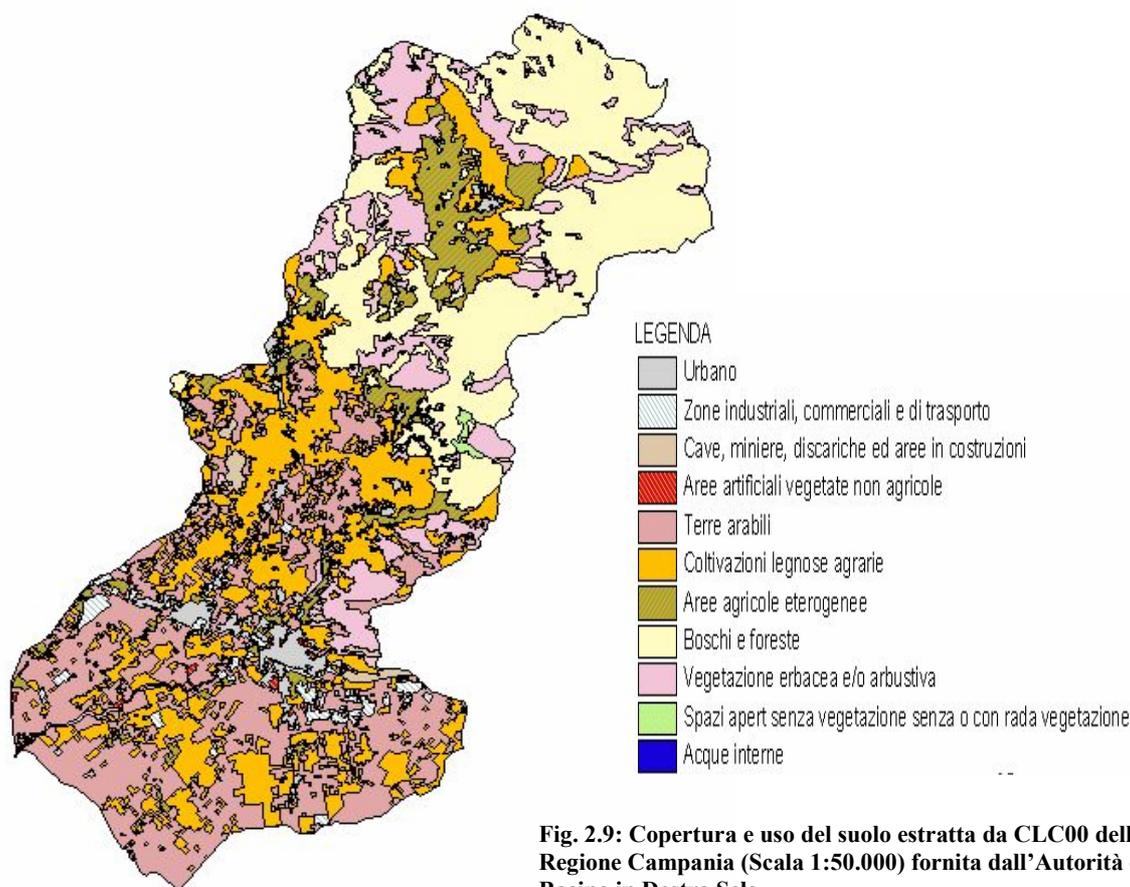


Fig. 2.9: Copertura e uso del suolo estratta da CLC00 della Regione Campania (Scala 1:50.000) fornita dall'Autorità di Bacino in Destra Sele

Una versione più recente e, in parte differenziata, è la “**Carta dell’Utilizzazione Agricola dei Suoli della Campania (CUAS)**”, in scala 1:50000, redatta dal Settore Sperimentazione Informazione Ricerca e Consulenza in Agricoltura (SE.S.I.R.C.A.) della Regione Campania con il supporto dell’ITA (Consorzio Italiano per il Telerilevamento in Agricoltura), elaborando delle riprese aeree (1998-99) e delle immagini Landsat (maggio 2001, luglio 2001 e aprile 2002). Il risultato ottenuto è riportato in figura 2.10.

Da una tale descrizione del territorio è possibile dedurre in modo reale il tipo di impatto che le attività antropiche comportano, le lavorazioni meccaniche ed i loro effetti sulla struttura e sull'erodibilità del suolo, i trattamenti di fertilizzazione o di difesa fitosanitaria ed i loro effetti sulla qualità della sostanza organica.

Le categorie definite in tale carta forniscono, quindi, una base molto importante di conoscenza perché, oltre a consentire valutazioni sulle lavorazioni meccaniche, le irrigazioni, ecc. permettono di avanzare previsioni, sia pure di massima, sui possibili differenti trattamenti chimici (fertilizzanti, diserbanti, fitosanitari) cui sono soggette le diverse colture nell'agricoltura moderna.

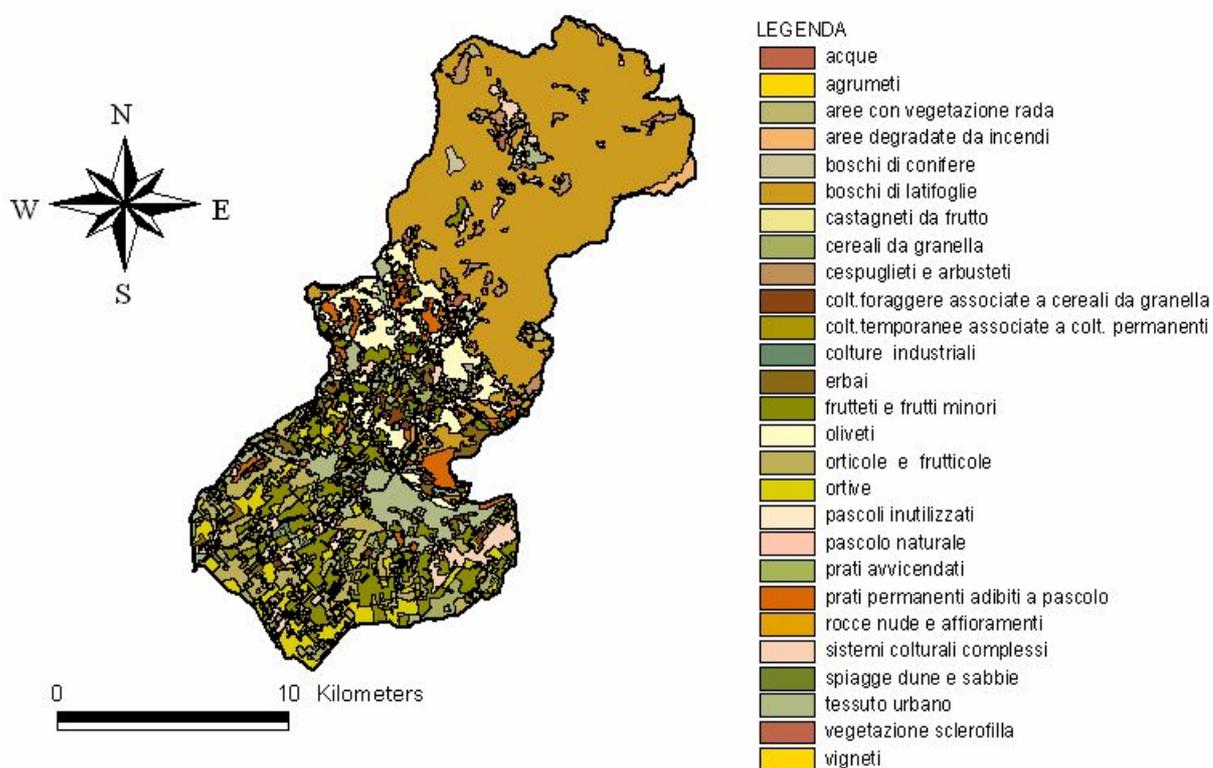


Fig. 2.10: Carta dell'uso agricolo del bacino del fiume Tusciano. (Fonte: SeSIRCA, Regione Campania)

Come è possibile notare da un confronto tra le carte, appare evidente che nella fig. 2.9 viene data maggiore enfasi alle zone dedicate alle attività antropiche (cave e miniere, zone industriali, commerciali e di trasporto) mentre nella fig. 2.10 tali aree sono indicate generalmente come tessuto urbano e vengono invece differenziate le classi in relazione al tipo di coltura agraria che insiste sul territorio. La seconda carta dunque, con le 28 classi di uso del suolo riportate in

legenda, è quella più dettagliata e sarà dunque utilizzata successivamente nella stima dell'erosione con la RUSLE.

Le informazioni desunte dall'analisi di queste carte, unitamente alla caratterizzazione climatica, geologica e geolitologica del bacino, hanno costituito la base per l'analisi dell'erosione nel territorio del bacino pilota.

Par. 2.3 – Caratteristiche geologiche e litologiche

Il bacino del Fiume Tusciano ricade in quattro fogli della carta geologica d'Italia 1:100000:

- Foglio n. 185 – Salerno: per una piccola zona a ovest del bacino (Fig. 2.11);
- Foglio n. 186 – Sant'Angelo dei Lombardi: per l'intera parte montana del bacino (Fig. 2.12);
- Foglio n. 197 – Amalfi: per la zona sud-ovest del bacino (Fig. 2.13);
- Foglio n. 198 – Eboli: per la zona sud-est del bacino (Fig. 2.14).

Nei riquadri è riportato in rosso il limite del bacino che è interessato dal foglio.

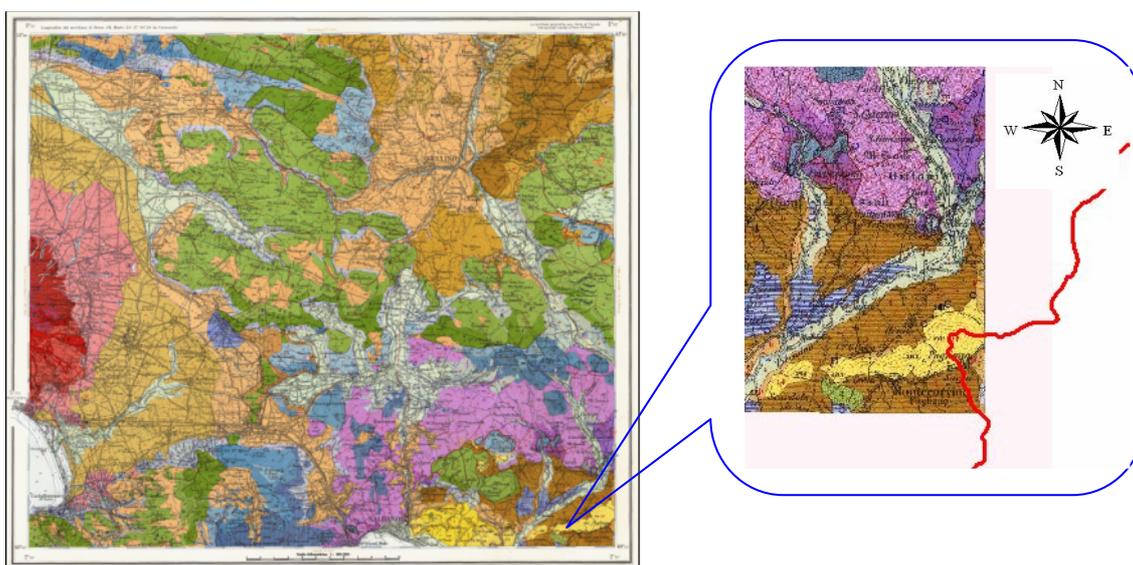


Fig. 2.11: Carta geologica 1:100.000 foglio n. 185 – SALERNO

LEGENDA:

-  Puddinghe poligeniche ad elementi prevalentemente mesozoici e cemento calcitico, generalmente stratificate, prive di fossili.
-  Argille e marne siltose grigio-plumbee, o varicolori, talora scagliose e con intercalazioni più o meno frequenti di calcari marnosi, siliciferi, e manganesiferi e di arenarie; inglobano pezzate e pacchi di strati di varia natura (calcari marnosi, calcari detritici, diaspri) e di varia età; affiorano generalmente con giacitura caotica ed in rapporti tettonici con gli altri terreni mesozoici e terziari.
-  Arenarie quarzoso-micacee giallastre, subordinatamente quarzoareniti, con intercalazi di marne, calcari marnosi, brecciole calcaree a *Miogypsina* sp., *Nephrolepidina* sp., nummuliti rimaneggiate.
-  Breccia di pendio ad elementi eterogenei a dimensioni variabili, generalmente con stratificazione conforme alla morfologia. Lembi di terrazzi costituiti da breccie ad elementi angolosi, provenienti dalle formazioni calcareo-dolomitiche mesozoiche, a cemento calcitico, in strati in genere poco evidenti.

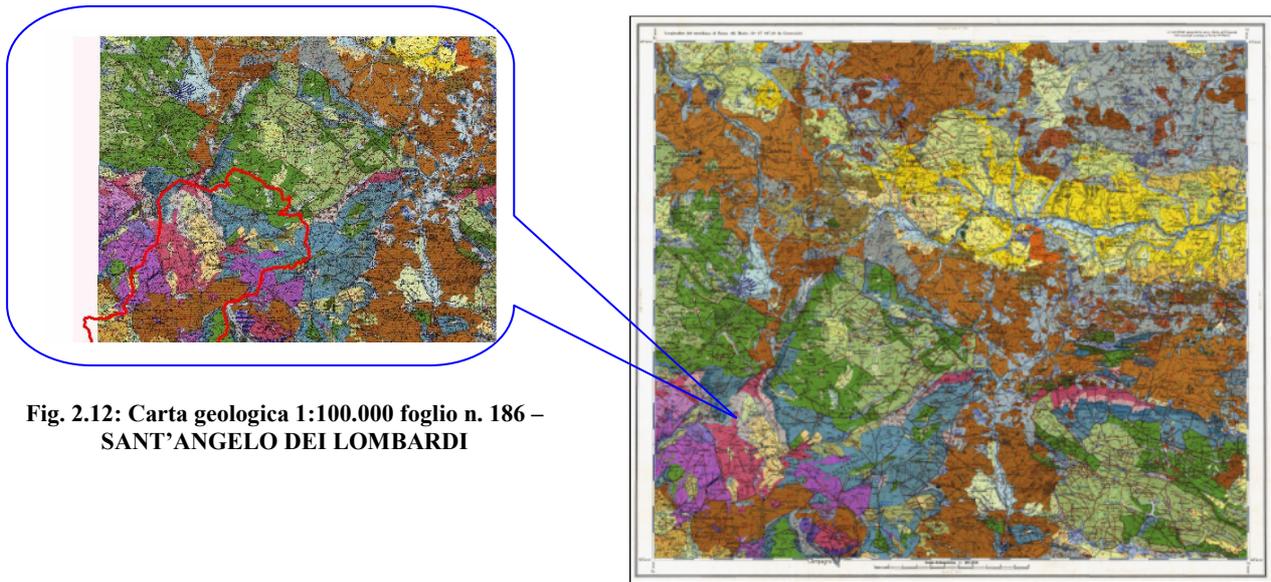


Fig. 2.12: Carta geologica 1:100.000 foglio n. 186 – SANT'ANGELO DEI LOMBARDI

LEGENDA:

- Dolomie grige stratificate, a volte in straterelli molto fitti, con livelli bituminosi nella parte alta. Fossili assenti.
- Complesso calcareo-marnoso arenaceo – Scisti argilloso marnosi galestrini, talora aciculari, di vario colore; marnoscisti, calcari marnosi rosso-rosati; marne, calcari marnosi paesiniformi, a volte con selce; alcali giallo-brunastri, ecc., silicei, con *Orbulinge*; calcareniti minute; molasse giallastre, ecc.
- Dolomie bianche e grigio-chiare saccaroidi, stratificate, a *Gervilleia exilis*, *Worthenia solitaria*, megalodontidi, *Sphaerocodium* sp., *Evinospongiae*, abbondanti resti algali tipo stromatoliti.
- Marne più o meno compatte, grigio-verdastre, grigio-verde-brunastre, talora con piccoli lamellibranchi; microfaune frequentemente di incerto significato.
- Calcari compatti finemente detritici, dolomie grigie e rosate, calcari oolitici e conglomerati bianchi ed avana, con *Orbitopsella praecursor* e *Palaeodasycladus mediterraneus*; abbondanti molluschi statizzati e calcari oolitici avana, nella parte terminale.
- Calcari pseudosaccaroidi bianchi con *orbitoides media*, *siderolites* sp., *Globotruncana* spp., passanti localmente a calcari bianchi detritici, con piccoli coralli, melobesie, *Nummulitinae* e *Globigerinidae* nane ad affinità paleocenica.
- Detrito di falda cementato e breccie di pendio, a luoghi in strati; talora, copertura di detrito non cementato.
- Lembi di terrazzi costituiti da breccie con cemento calcitico, ad elementi angolosi o poco arrotondati, provenienti dalle formazioni calcareo-dolomitiche mesozoiche: per lo più in residui sui rilievi mesozoici: sovente in distinti banchi e poco inclinati, talvolta in strati mal distinguibili.

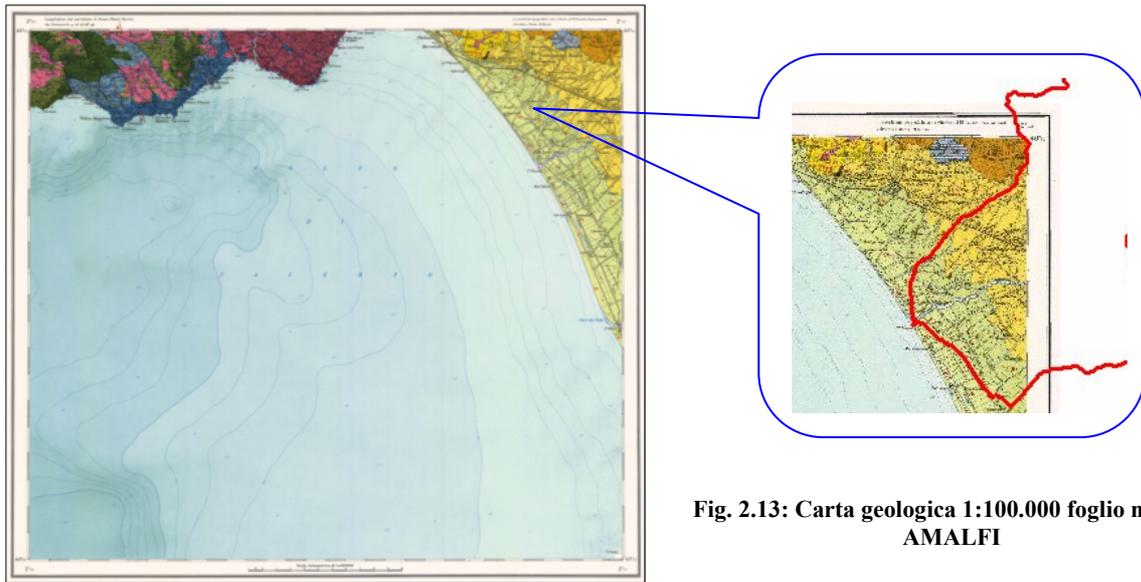


Fig. 2.13: Carta geologica 1:100.000 foglio n. 197 – AMALFI

LEGENDA:

-  Puddinghe poligeniche stratificate con elementi, anche di grandi dimensioni, appartenenti prevalentemente alla serie mesozoica e subordinatamente ai terreni del Flysch, alternate e frammiste a sabbioni.
-  Sabbie alluvionali costituenti terrazzi fino a +10 metri s.l.m., riempimento di depressioni residuo da acque stagnanti.

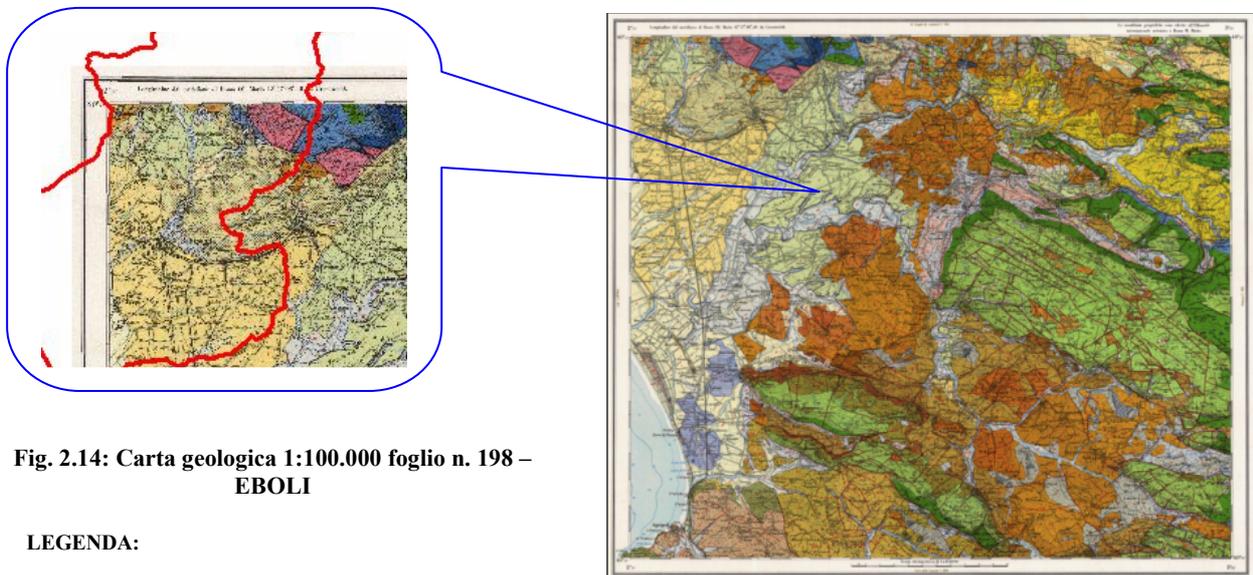


Fig. 2.14: Carta geologica 1:100.000 foglio n. 198 – EBOLI

LEGENDA:

-  Alluvioni e depositi lacustri
-  Alluvioni antiche terrazzate in più ordini
-  Depositi di ciottoli e di pietrisco non cementati, ad elementi di dolomia e di calcari dolomitici mesozoici, più o meno stratificati, talvolta a stratificazione incrociata.
-  Dolomie saccharoidi e cristalline biancastre o grigie, spesso bituminose, massicce o in banchi e strati; nella parte alta prevalenti intercalazioni calcaree contenenti resti di molluschi, *Tripsina hantkeni*, *Aulotortus* sp., *Fronicularia* sp., frammenti di alghe *Dasycladaceae*.
-  Calcari pseudocristallini, pseudoolitici, micritici di colore grigio-chiaro, biancastro, avana, talora con impronte di alghe e gasteropodi, con *Clypeina jurazzica*, *Kurnubia palastiniensis*, *Pfenderina salernitana*, *Selliporella donzellii*, *Nautiloculina oolitica*, *Thaumatoporella parvovesciculifera*.

I terreni appartengono alla serie carbonatica della piattaforma campano-lucana. L'alveo del Fiume Tusciano nel suo settore più settentrionale è impostato su delle faglie che separano il massiccio montuoso dei picentini in due zone geologicamente diverse: la zona occidentale, con affioramenti di dolomie triassiche (Monti Terminio, Acellica e Mai) e la zona orientale, con rocce calcaree del Cretacico o del Giurassico (Monti Cervialto e Polveracchio).

Dal punto di vista geologico, l'area in esame presenta una situazione stratigrafica e strutturale estremamente complessa, come evidenziato anche dalla recente letteratura sull'area (*Di Nocera et al., 2006*).

Per questo studio ci si è limitati all'individuazione dei litotipi affioranti ed alla loro diversa propensione al fenomeno erosivo.

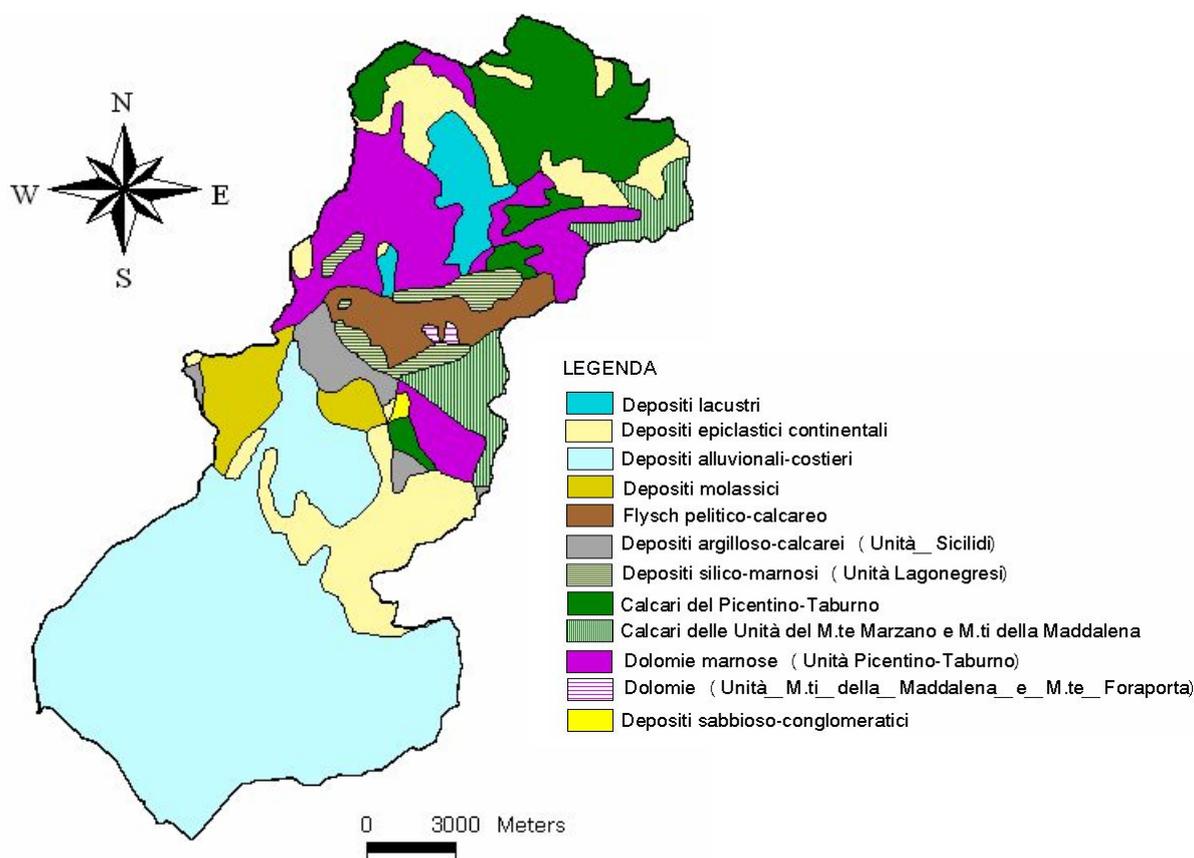


Fig. 2.15: Carta geolitologica del bacino del Tusciano (mod. da Celico et al. 2004)

Il Bacino del fiume Tusciano, sia dal punto di vista geomorfologico che geolitologico, si può dividere in due parti, come evidenziato anche dalla *carta geolitologica* riportata nella fig. 2.15 (*modificata da Celico et al., 2004*):

- un settore prevalentemente *calcareo-dolomitico* localizzato nella zona montana-collinare del bacino; in tale settore sovente i toponimi locali “raia” o “raio” sono utilizzati per individuare corsi d’acqua che scorrono in gole profonde ed incassate;

- un settore dei *depositi alluvionali* prevalenti, che caratterizzano la zona valliva del bacino.

Nel *primo settore* sono da comprendere le seguenti unità Geolitologiche:

√ *Depositi lacustri*: depositi argillo-limosi, talora con intercalazioni ciottolose e banchi di lignite (Acerno) (Budetta et al., 1988).

√ *Flysch pelitico-calcareo*: vi fanno parte prevalentemente le unità Irpine. Si tratta di alternanze arenaceo-marnoso-siltitiche, talora con olistoliti carbonatici. Tale unità risulta molto erodibile.

√ *Depositi argilloso-calcarei (Unità Sicilidi)*: fanno parte le unità delle Argille Varicolori. Data la preponderante presenza di argille e marne, esso è fortemente erodibile. Le unità appartenenti a questo complesso sono quasi ovunque in contatto tettonico con la serie di piattaforma.

√ *Depositi silico-marnosi (Unità Lagonegresi)*: I litotipi che ne fanno parte, per i fini di questo lavoro, si possono considerare molto erodibili rispetto alla serie carbonatica, così come si può riscontrare ai margini della finestra tettonica di Campagna (dove esso affiora, in maniera continua, a contatto con monte Polveracchio-monte Raione). Inoltre, nell'area a nord della finestra tettonica, le stesse unità Lagonegresi si portano a quota alta, al di sotto di un debole spessore di dolomia triassica: circa 150 m (Celico et al., 1987).

√ *Calcari del Picentino-Taburno e delle Unità del M.te Marzano e M.ti della Maddalena*: I litotipi rappresentano i termini superiori della serie di piattaforma Campano-Lucana. Sono molto fratturati e carsificati, ma ciò nonostante la loro erodibilità è minore delle due unità prima citate.

√ *Dolomie e Dolomie marnose*: poggiano tettonicamente sui depositi silico-marnosi, costituiscono il termine più basso (Trias) della serie di piattaforma Campano-Lucana. Si rinvengono, in quasi tutta l'area, fortemente tettonizzate.

Nel *secondo settore* sono da comprendere le seguenti unità Geolitologiche:

* *Depositi alluvionali-costieri*: sono essenzialmente i depositi di riempimento dell'area ribassata individuata a partire dal Messiniano (piane dei Fiumi Sele e Tusciano). Si tratta di successioni argillose (spessore 70-80 m), con frequenti intervalli torbosi che passano verso la costa a depositi prevalentemente sabbiosi (Budetta et al., 1994).

* Depositi epiclastici continentali: include tutti i terreni in facies alluvionale e di transizione, compresi fra i depositi sabbioso-conglomeratici (Conglomerati di Eboli) e i depositi sopra descritti. Costano di alternanze di ghiaie e argille della potenza di alcuni metri che arrivano fino a 250 m di profondità.

* Depositi sabbioso-conglomeratici e molassici: Affiorano nella zona di Eboli (Conglomerati di Eboli) e Battipaglia, con spessori visibili di alcune centinaia di metri e caratteristiche litologiche variabili. A luoghi sono breccie ben cementate e spesso carsificate, altrove si tratta di ghiaie pressoché sciolte a matrice sabbiosa. Sono presenti anche livelli di argille, sabbie e paleosuoli (*Budetta et al., 1994*).

CAPITOLO 3:

IL SISTEMA INFORMATIVO TERRITORIALE

Par. 3.1. – Introduzione

Uno degli approcci più efficaci per affrontare problematiche relative agli studi ambientali, nella pianificazione territoriale e nella gestione delle risorse naturali, consiste nell'impiego di un sistema informativo geografico (*G.I.S.*, *Geographical Information System*) o territoriale (*S.I.T.*, *Sistema Informativo Territoriale*) come strumento di supporto (**De Rosa, 2003**).

Per *sistema informativo* si intende “*uno strumento computerizzato che permette di raccogliere, memorizzare, posizionare, richiamare, analizzare, trasformare e rappresentare dati georiferiti ed eventi che esistono e si verificano sul territorio*”.

Sempre più spesso, in Italia, si parla indifferentemente di **G.I.S.** e di **S.I.T.** come se le due definizioni coincidessero, mentre in realtà un G.I.S. fa esplicito riferimento alla rappresentazione geografica di informazioni; infatti “**geografico**” è ciò che attiene alla rappresentazione grafica della Terra e della superficie terrestre ai più diversi livelli di dettaglio.

Il S.I.T., invece, facendo riferimento al territorio, può anche prescindere dall'aspetto meramente cartografico; infatti per “**territoriale**” si intende ciò che attiene al territorio che, a sua volta, è un concetto giuridico che identifica una porzione della superficie terrestre delimitata da confini amministrativi.

Da questo punto di vista, un Sistema Informativo Territoriale non è necessariamente anche un Sistema Informativo Geografico, mentre è evidente che un Sistema Informativo Geografico è anche un Sistema Informativo Territoriale (**Caprioli, 2006**).

Tuttavia, la definizione più utilizzata per indicare un G.I.S. è considerarlo come “l'insieme complesso di risorse hardware, software, umane ed intellettive per acquisire, processare, analizzare, immagazzinare e restituire in forma grafica ed alfanumerica dati riferiti ad un territorio” (**Fig. 3.1**).

La validità dei risultati ottenuti è condizionata in ugual modo da tutte queste componenti e la carenza di una sola di queste è in grado di condizionare fortemente la qualità dell'intero sistema.

Il G.I.S. permette di condurre analisi spaziali attraverso la rappresentazione digitale di un'area geografica abbinata ad altre informazioni di tipo alfanumerico che dipendono sostanzialmente dal tipo di studio che si sta conducendo.

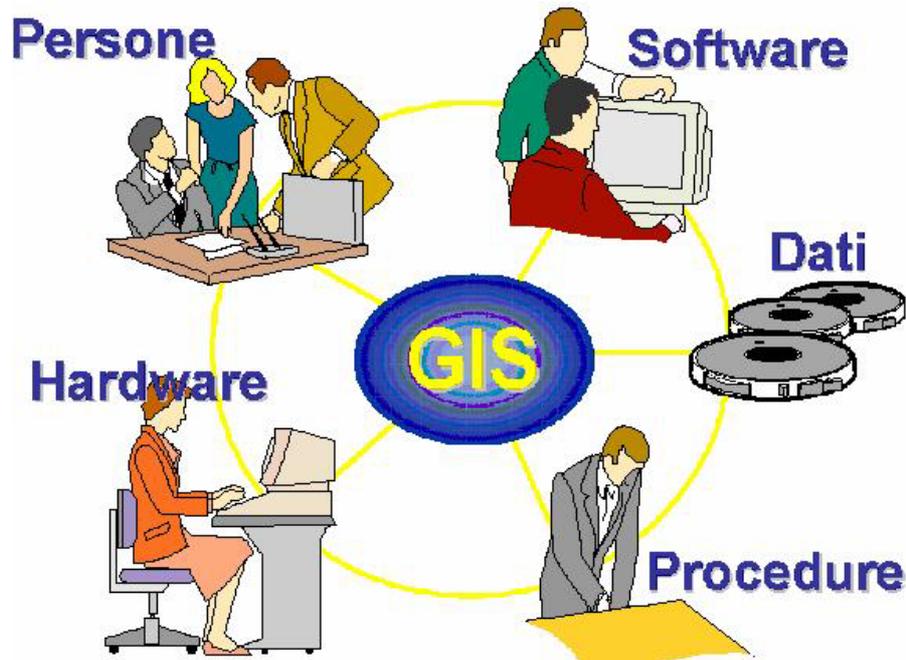


Fig. 3.1: Definizione adottata per definire un Sistema Informativo Geografico. (tratta da Caiaffa, 2006)

Tale sistema, oltre a fornire uno strumento valido nell'integrazione e nella correlazione di dati di natura assai diversa tra loro, ha introdotto la possibilità di "vedere" i dati e/o l'ammontare dei dati stessi su una mappa, fornendo anche la posizione di dette informazioni nello spazio e nel tempo. La maggiore attrattiva dello strumento G.I.S. è, però, quella di poter contenere moltissime informazioni e dati, anche assai diversi fra loro, *"tutto in uno"* come avviene nel caso delle carte di uso del suolo, delle mappe catastali, delle ortofoto, delle carte topografiche, delle immagini da satellite e delle tabelle (in excel) che, una volta integrate in un G.I.S. ad hoc, danno l'opportunità, anche ai non addetti ai lavori, di poter formulare giudizi e/o previsioni legati alla gestione del territorio (Caiaffa, 2006).

Per questa loro versatilità i sistemi G.I.S. sono attualmente utilizzati nei più svariati settori: in agricoltura, nella protezione civile, nei settori ambientali, nelle amministrazioni comunali, nelle aziende che gestiscono le reti tecnologiche, nel settore delle analisi socio-demografiche e di mercato, nei trasporti, nella progettazione di opere ed infrastrutture, nel settore delle telecomunicazioni, ecc. È proprio questa loro vasta applicabilità ad averne favorito negli ultimi anni l'ampia diffusione.

Par. 3.2. – Acquisizione e memorizzazione dei dati

I dati costituiscono la componente più importante dei sistemi informativi geografici. Il loro ruolo rilevante è dato non solo dal loro contenuto informativo, ma anche dal costo, che spesso è superiore al 70% del costo complessivo del sistema (*Caprioli, 2006*).

Le *fonti* di tali dati possono essere le più svariate: dalle carte topografiche di base, ai dati relativi alla popolazione, alle imprese, alle risorse ambientali, ecc.

Il dato geografico, o elemento territoriale è, quindi, costituito da tre componenti:

- **posizionale** (geometrica), che descrive la forma e la posizione dell'oggetto strutturato ad alto livello, attraverso punti, linee, aree, pixel;
- **descrittiva** (alfanumerica), che esprime il valore di una grandezza e si manifesta in una serie di attributi (valori numerici, stringhe di caratteri, toponomastica) che descrivono le caratteristiche degli oggetti;
- **topologica**, di relazione tra gli oggetti, necessaria per l'effettuazione delle analisi spaziali (*Caprioli, 2006*).

La schematizzazione del territorio può avvenire secondo due approcci: **rappresentazione vettoriale** e **rappresentazione raster** (Fig. 3.2).

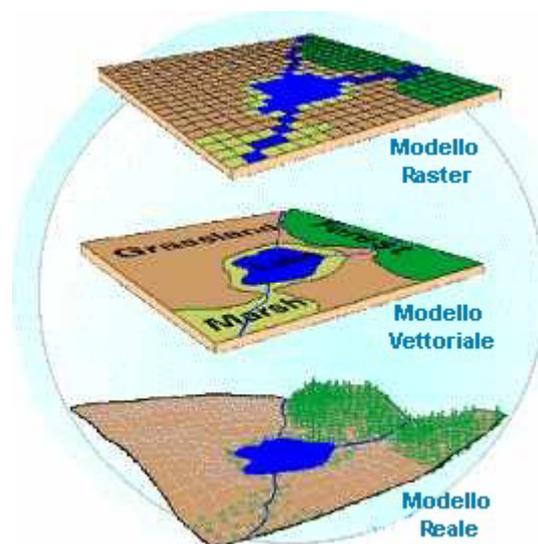


Fig. 3.2 – Differenza tra modello vettoriale e modello raster.
Fonte: <http://xoomer.alice.it/a.dellaserra/pagina1/pagina2/1/9.htm>

Nel **modello vettoriale**, le informazioni su punti, linee e poligoni sono codificate e memorizzate come una collezione di coordinate x,y. La localizzazione di un oggetto puntuale può quindi essere rappresentata come una singola coppia di coordinate mentre oggetti lineari (come ad es.

strade e fiumi) saranno memorizzati come una stringa di coordinate x,y. Gli oggetti poligonali (come ad es. i bacini idrici) saranno invece memorizzati come aree omogenee perimetrare (**De Rosa, 2003**).

A ciascun elemento è associato un *record* del *database* informativo che contiene tutti gli attributi dell'oggetto rappresentato.

I sistemi vettoriali sono capaci di risoluzione molto alta (anche dell'ordine dei decimi di mm) e l'output grafico è molto simile alle mappe disegnate a mano. Questo tipo di sistema lavora bene con azimut, distanze e punti, richiede meno memoria di massa e riesce più facilmente a mantenere le relazioni topologiche (**Carlucci, 2006**).

Nel **modello RASTER** i dati geografici vengono visualizzati, localizzati e memorizzati utilizzando una matrice o griglia di celle, generalmente di forma quadrata o rettangolare, ciascuna delle quali viene denominata *pixel*. Ad ogni pixel sono associate le informazioni relative a ciò che esso rappresenta sul territorio. La dimensione del pixel (detta *pixel size*), generalmente espressa nell'unità di misura della carta (metri, chilometri, etc.), è strettamente relazionata alla precisione del dato.

La risoluzione dei dati raster dipende dalla dimensione del pixel o della cella della griglia e può variare da dimensioni sub-metriche a molti chilometri (**Carlucci, 2006**). Tale modello è stato concepito per le discipline che utilizzano dati da satellite, e si presta bene a gestire dati tematici nel campo della geofisica, della modellazione atmosferica ed ambientale (**Caprioli, 2006**).

L'aspetto meno favorevole di una gestione dei dati tipo raster risiede nella gran mole di dati che viene generata anche nel caso di rappresentazioni elementari. Il modello raster si rivela più utile quando la rappresentazione fa riferimento a scale medie (nell'ordine almeno di 1:5000) e quando si debbono interpretare informazioni di tipo prevalentemente areale (**Bagarello e Ferro, 2006**).

Ogni dato del mondo reale può essere rappresentato sia in forma vettoriale che raster, e la scelta è affidata all'utente. Ognuno dei sistemi di rappresentazione ha i suoi vantaggi e svantaggi che sono riportati nella tab. 3.1 (**Carlucci, 2006**).

I dati vettoriali e i dati raster si adattano ad usi diversi. La *cartografia vettoriale* è particolarmente adatta alla rappresentazione di dati che variano in modo discreto (ad esempio l'ubicazione dei cassonetti dei rifiuti di una città, la rappresentazione delle strade, l'idrografia);

invece, la *cartografia raster* è più adatta alla rappresentazione di dati con variabilità continua (ad esempio un modello digitale di elevazione, D.E.M. o una carta di acclività del versante).

Tab. 3.1 – Vantaggi e svantaggi dei metodi di rappresentazione raster e vettoriale. (Carlucci, 2006)

Metodo	Vantaggi	Svantaggi
RASTER	<ul style="list-style-type: none"> • Semplice struttura dei dati • Compatibilità con dati telerilevati o acquisiti da scanner • Semplici procedure di analisi spaziale 	<ul style="list-style-type: none"> • Richiede grandi quantità di memoria di massa • Dipendentemente dalla dimensione del pixel l'output grafico può essere meno gradevole • Le trasformazioni proiettive sono molto difficili • Maggiore difficoltà nel rappresentare relazioni topologiche
VETTORIALE	<ul style="list-style-type: none"> • Richiede meno memoria di massa • Le relazioni topologiche sono prontamente mantenute • L'output grafico è più simile alle mappe disegnate a mano 	<ul style="list-style-type: none"> • Struttura dei dati più complessa • Meno compatibilità rispetto ai dati telerilevati • Software e hardware spesso meno costosi • Alcune procedure di analisi spaziali possono essere più difficili • La sovrapposizione di molte mappe vettoriali spesso richiede molto tempo

Sebbene entrambi i modelli di memorizzazione di dati geografici abbiano vantaggi e svantaggi, i moderni strumenti G.I.S. sono in grado di gestire dati provenienti sia dal modello vettoriale che dal modello raster.

L'inserimento, l'*editing*, la gestione e l'elaborazione dei dati rappresentano quindi gli step fondamentali nella progettazione di un G.I.S. Le fasi successive sono la produzione di elaborazioni cartografiche (ad es. carte tematiche, ecc.) e la creazione di un'interfaccia "sistema-utente" che permetta di interrogare il sistema e di analizzare i dati in funzione di specifiche richieste (*Bagarello e Ferro, 2006*).

Par. 3.3 - Sistemi di riferimento

La principale caratteristica di un G.I.S. è la capacità di *georeferenziare* i dati, cioè di attribuire ad ogni elemento le sue coordinate spaziali reali; infatti, le coordinate di un oggetto sono memorizzate secondo le coordinate del sistema di riferimento in cui è realmente situato l'oggetto.

Per visualizzare oggetti geografici nella loro forma e localizzazione corrette, occorre avere a disposizione dei metodi che li "trasferiscano" da una superficie tridimensionale, come quella terrestre, ad una superficie bidimensionale come quella di una mappa. Tali metodi vengono detti *proiezioni*.

Ogni proiezione ha qualità che possono renderla più o meno appropriata per certe applicazioni. Le "proiezioni di sviluppo" che rappresentano gli oggetti proiettandoli su superfici bidimensionali si distinguono in:

☞ **Piana o prospettica** - Si approssima il geoide con la sfera locale nel punto situato al centro della zona da rappresentare, e si proiettano i punti della superficie terrestre sul piano tangente alla sfera locale.

☞ **Cilindrica** - Il geoide viene approssimato con l'ellissoide (o anche con la sfera locale). La proiezione avviene su di un cilindro tangente lungo l'equatore (nel caso della *proiezione cilindrica diretta*, Fig. 3.3), o su di un cilindro tangente lungo un meridiano (per la *proiezione cilindrica inversa*, Fig. 3.4), proiettando ogni punto o dal centro della sfera o dal centro del parallelo del punto.

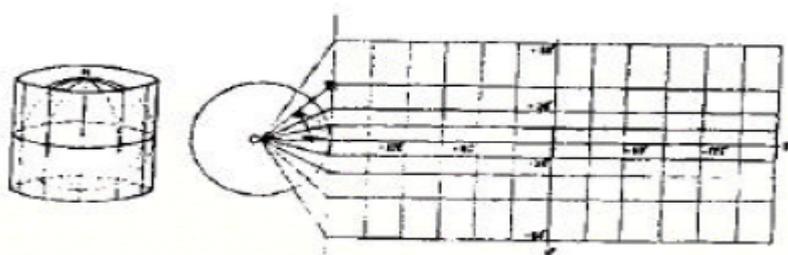


Fig. 3.3 – Proiezione cilindrica diretta. (Caprioli, 2006)

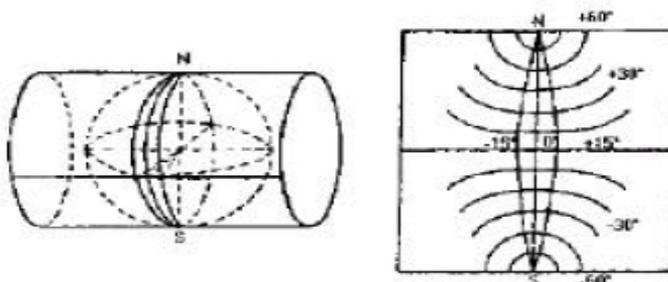


Fig. 3.4 – Proiezione cilindrica inversa. (Caprioli, 2006)

Successivamente il cilindro, tagliato lungo una generatrice, viene sviluppato sul piano. Anche in questo caso le deformazioni sono contenute solo a cavallo della linea di tangenza ed eventualmente si possono usare più cilindri secanti per ridurre le deformazioni ai margini della zona interessata.

☞ **Conica:** Il geoide, approssimato all'ellissoide o alla sfera locale; viene proiettato sul cono che gli è tangente lungo il parallelo alla latitudine media della fascia da rappresentare con centro di proiezione di ogni punto P al centro dell'ellissoide o al centro del parallelo del punto. Il cono viene poi sviluppato sul piano (Fig. 3.5) (Caprioli, 2006).

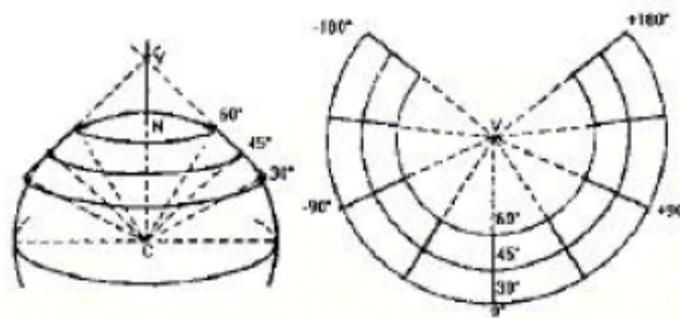


Fig. 3.5 – Proiezione conica. (Caprioli, 2006)

Le “*proiezioni convenzionali*”, invece, pur derivando dalle proiezioni di sviluppo, usano procedimenti empirici e non geometrici, per ottenere determinate caratteristiche.

La conversione da un sistema tridimensionale ad uno bidimensionale provocherà sempre delle distorsioni nelle seguenti proprietà:

- Forma
- Area
- Distanza
- Direzione

Tra le varie proiezioni esistenti ognuna sarà valida per rappresentare una o più proprietà spaziali, ma nessuna di esse può mantenere tutte e quattro le proprietà. Siccome queste proprietà spaziali sono spesso utilizzate per processi decisionali, è opportuno conoscere quali proprietà sono distorte da ciascuna proiezione (De Rosa, 2003).

Ad esempio, considerando la proiezione cilindrica pura, con cilindro tangente lungo l'equatore, si ottiene che meridiani e paralleli si proiettano secondo linee rette, parallele tra loro e a distanza costante per i meridiani, mentre risultano a distanza crescente con la latitudine i

paralleli. La rappresentazione così ricavata contiene delle deformazioni che crescono al crescere della latitudine. Mercatore (1569) modificò tale proiezione in modo da ottenere una *carta conforme* (Fig. 3.6).

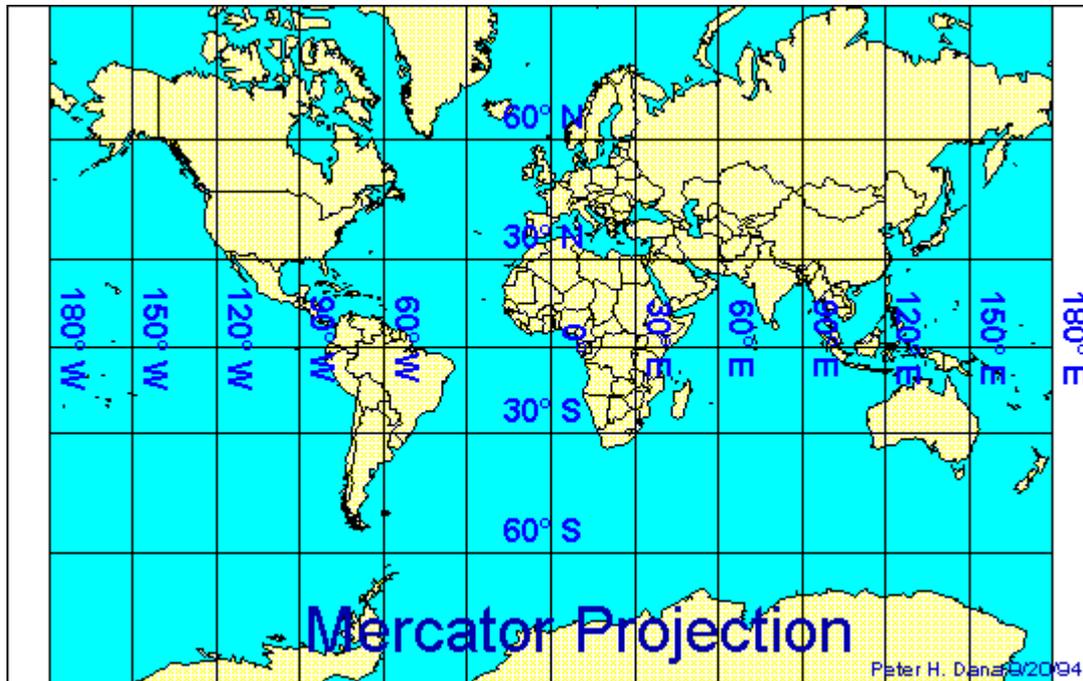


Fig. 3.6 - Rappresentazione cilindrica conforme di Mercatore

Fonte: <http://geomatica.como.polimi.it/corsi/cartografialaurea/principalsistemicartografici/cilindricamercatore.htm>

Combinando una proiezione con informazioni quali ellissoide, meridiano e parallelo di origine, ecc., si ottiene un *sistema di coordinate*, utilizzato per rappresentare una precisa porzione di territorio.

I vantaggi di tale tipo di rappresentazione, che viene utilizzata molto per la navigazione marittima e aerea, si riferiscono in particolare alla possibilità di rappresentare con continuità l'intera superficie del globo (tra -80° e $+80^\circ$ di latitudine) in un unico sistema di coordinate piane.

La rappresentazione cilindrica di Mercatore è stata sostituita dalla proiezione "*cilindrica trasversa*" di Gauss, o "*inversa*", in quanto può essere ottenuta per inversione dalla rappresentazione di Mercatore cioè con il cilindro tangente all'ellissoide lungo un meridiano. Si ricava una proiezione del tipo mostrato in fig.3.7, nel quale è riportato il reticolato geografico relativo al semiellissoide compreso tra le longitudini -90° e $+90^\circ$. Per ridurre le fortissime deformazioni ai margini, occorre limitare il valore della differenza di longitudine dei punti

rispetto al meridiano di tangenza, pertanto la rappresentazione viene effettuata per “fusi” di una limitata ampiezza (in genere 6°), per ognuno dei quali si assume come meridiano di riferimento quello coincidente con il meridiano di tangenza, ovvero il meridiano centrale del fuso (fig. 3.8). Con la limitazione di ampiezza del fuso si ha il vantaggio di ridurre le deformazioni in limiti accettabili.

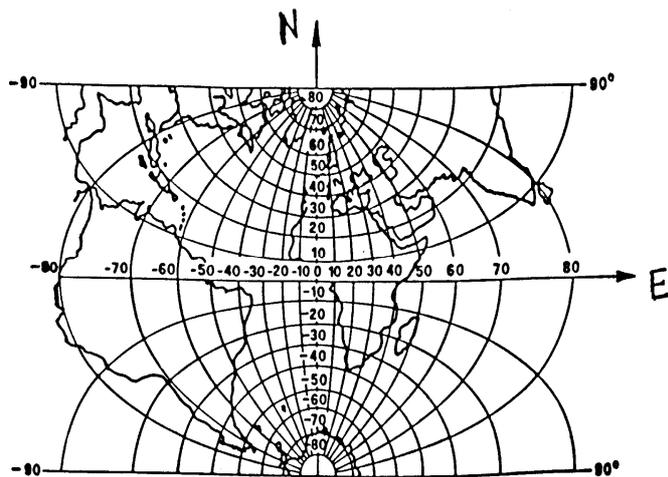


Fig. 3.7: Reticolato geografico nella proiezione di Gauss.

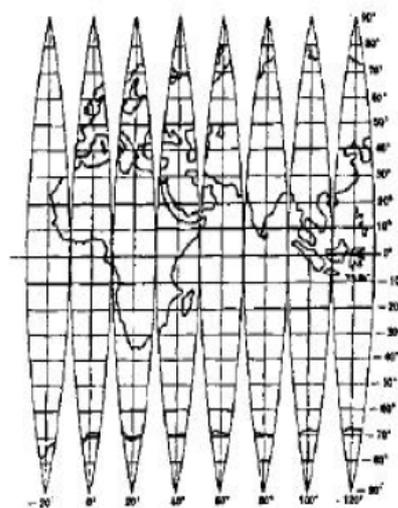


Fig. 3.8: Fusi nella carta di Gauss.

La carta di Gauss, con il sistema di rappresentazione policilindrico per fusi, è stata adottata in diversi stati compresi tra -80 e $+80$ di latitudine.

Naturalmente ogni fuso ha il suo sistema di riferimento per le coordinate piane e, in particolare, nel *Sistema U.T.M. (Universal Transverse Mercator)* si è convenuto di assumere per il meridiano centrale del fuso rettificato una coordinata y o E di 500 km (per evitare ascisse negative) mentre le ordinate x o N sono riferite all'equatore rettificato. Tale sistema, valido in tutto il globo, permette di esprimere in cifre la posizione planimetrica di qualsiasi punto.

A tale scopo, si indica dapprima il fuso numerandolo da 1 a 60 a cominciare da ovest e procedendo verso Est. Il numero 1 è compreso tra i meridiani 180° e 174° W da Greenwich, il numero 31 da 0° a 6° E.

L'Italia è, quindi, compresa nei fusi 32° , 33° e per una parte della penisola salentina, anche dal 34° .

Ogni fuso è diviso in 20 “zone” ciascuna avente 8° di latitudine indicate da lettere maiuscole (l'Italia che si estende in latitudine da circa 36° a 48° è interessata dalla zona S da 32° a 40° e dalla T da 40° a 48°).

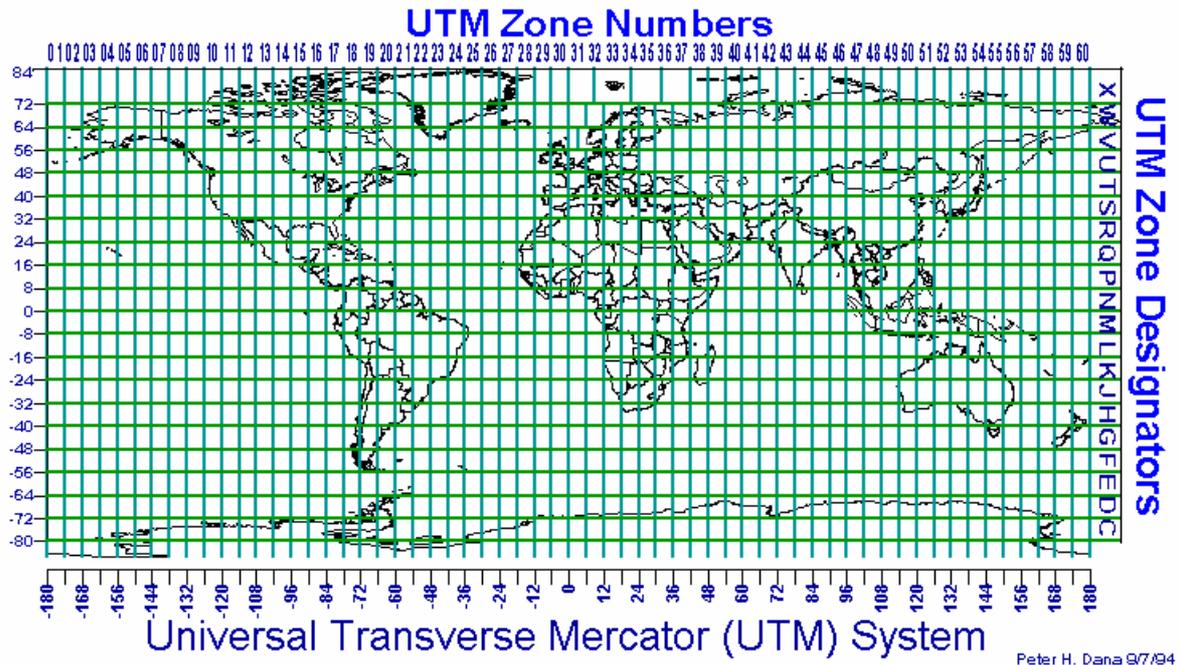


Fig. 3.9: Suddivisione del globo terrestre in zone UTM –
 Fonte: <http://geomatica.como.polimi.it/corsi/cartografia/laurea/cartografiaufficialeitaliana/Image708.gif>

Ciascuna zona è suddivisa in quadrati di 100 Km di lato, individuati da una coppia di lettere maiuscole (Fig. 3.9). In definitiva, ciascun punto è individuato da:

- numero del fuso;
- lettera della zona;
- coppia di lettere del quadrato di 100 km;
- coordinate piane N e E.

La coordinata N esprime la distanza dall'equatore mentre la E definisce la distanza dalla falsa origine con l'approssimazione relativa alla scala della carta (ad es. per l'I.G.M. 1:25000 è pari a ± 5 m).

La cartografia ufficiale dello Stato italiano è in scala 1:25.000 ed è stata realizzata dall'Istituto Geografico Militare, nella rappresentazione conforme di Gauss con formule di trasformazione ricavate dal prof. G. Boaga (1918-1961), da cui il nome di “*sistema Gauss-Boaga*”. In tale sistema all'Italia competono due fusi: il fuso 32 (detto anche fuso Ovest o 1° fuso) e il fuso 33 (detto fuso Est o 2° fuso) del sistema U.T.M.. Per ovviare alla discontinuità dei due sistemi di riferimento, è stata creata una “*zona di sovrapposizione*” di 30' (dal meridiano 12° al 12° 30') nella quale le coordinate dei punti sono riferite ad entrambi i sistemi. Il fuso Est, per includere anche l'estremità della penisola salentina che ricadrebbe nel 34°, si estende per altri 30' (Fig. 3.10).



Fig. 3.10 – Fusi della cartografia italiana nel sistema Gauss-Boaga.

Il sistema cartesiano di riferimento ha, quindi, l'asse delle ascisse coincidente con l'Equatore e l'asse delle ordinate coincidente col meridiano centrale del fuso. Per evitare valori negativi di ascissa e distinguere, allo stesso tempo, i valori che si riferiscono al fuso Est da quelli del fuso Ovest, sono stati attribuiti all'origine delle ascisse i valori chilometrici di 1500 e di 2520, rispettivamente per il fuso Ovest e per il Fuso Est (Fig. 3.10) (*De Rosa, 2003*).

La leggera differenza tra reticolato U.T.M. e reticolato Gauss-Boaga è dovuta al diverso “orientamento” dell'*ellissoide di Hayford*. Infatti, per il sistema U.T.M. è stato scelto come punto di emanazione un punto in prossimità di Potsdam (Germania) mentre per il Sistema Gauss-Boaga è stato utilizzato il punto corrispondente all'Osservatorio Astronomico di Monte Mario (Roma), di cui sono note le coordinate astronomiche e quindi la deviazione della verticale, che viene, quindi, “convenzionalmente” annullata in quel punto (*Caprioli, 2006*).

In Italia sono essenzialmente tre i sistemi di riferimento geodetici di principale interesse in ambito nazionale:

- Roma40;
- European Datum 1950, meglio noto come ED50;
- WGS84, acronimo di World Geodetic System 1984;

a ciascuno dei quali è stato associato un determinato sistema di rappresentazione cartografica.

Il **sistema di riferimento Roma40** è nato nel 1940 quando la Commissione Geodetica Italiana, a seguito della Risoluzione del 1924 dell'Associazione Internazionale di Geodesia, decise di adottare l'*ellissoide di Hayford 1909* (divenuto *ellissoide internazionale* nel 1924) come superficie di riferimento, i cui parametri identificativi sono:

- semiasse maggiore: $a = 6378388$

- schiacciamento: $s = 1/297$

Nel sistema di riferimento Roma40 l'orientamento dell'ellissoide è impostato sulla verticale del punto Roma Monte Mario (con azimut su Monte Soratte), caratterizzato dai seguenti valori astronomici (definizione 1940):

- latitudine $41^{\circ}55'25,51''$
- longitudine 0° ($12^{\circ}27'08,40''$ da Greenwich)

Ai fini della rappresentazione cartografica del sistema geodetico Roma40 è stata adottata la rappresentazione conforme di Gauss-Boaga, con fattore di scala di 0.9996.

Sebbene risalga al 1940, questo sistema di riferimento è ancora oggi utilizzato per fini geodetici e topografici e ad esso è riferita la rete italiana fondamentale di triangolazione, la Carta d'Italia al 100.000 e al 25.000. La maggior parte della cartografia tecnica oggi prodotta dalle regioni in formato digitale è inquadrata in tale sistema di riferimento.

Il **sistema di riferimento ED50**, European Datum 1950, è nato nell'immediato secondo dopoguerra per soddisfare le esigenze di coordinare le cartografie dei vari Paesi europei. Anche questo sistema di riferimento, analogamente al Roma40, utilizza l'ellissoide di Hayford quale superficie di riferimento, ma orientato in un punto nei pressi di Postdam, nel berlinese (orientamento medio europeo).

Le longitudini sono contate dal meridiano di Greenwich, le latitudini dall'equatore. Le coordinate geografiche di Roma Monte Mario in questo sistema sono:

- latitudine $41^{\circ}55'31,487''$
- longitudine $12^{\circ}27'10,930''$ (da Greenwich)

La rappresentazione piana del sistema geodetico ED50 avviene attraverso il sistema cartografico UTM che prevede la suddivisione della Terra in 60 fusi aventi ciascuno ampiezza di 6° di longitudine.

L'Italia ricade nei fusi 32, 33 e 34, i cui meridiani centrali si trovano rispettivamente a 9° , 15° e 21° di longitudine dal meridiano centrale di Greenwich.

Il fattore di scala sul meridiano centrale è per tutti i fusi pari a 0.9996.

Anche in questo caso sono state create delle zone di sovrapposizione tra i fusi, ed è stata adottata una falsa origine per le coordinate Est, uguale per tutti i fusi, pari a 500000 metri.

Questo sistema, dotato di un ridotto grado di accuratezza, è stato utilizzato in Italia solo per scopi cartografici.

Il *sistema di riferimento WGS84* è un sistema globale geocentrico, definito attraverso osservazioni spaziali e costituito da una terna cartesiana destrorsa con origine coincidente con il centro di massa della Terra, l'asse Z diretto verso il polo Nord convenzionale al 1984, l'asse X passante per il meridiano di Greenwich al 1984 e l'asse Y diretto in modo da completare una terna destrorsa. A questo sistema è associato l'ellissoide WGS84, anch'esso definito attraverso osservazioni spaziali, con centro e assi coincidenti con quelli della terna cartesiana.

L'ellissoide WGS84 è definito dai seguenti parametri:

- semiasse maggiore: $a = 6378137$
- schiacciamento: $s = 1/298.257223563$

La realizzazione su scala mondiale del WGS84, sistema di riferimento per i posizionamenti effettuati con strumenti GPS, è curata dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti, che con una rete di stazioni a terra gestisce la costellazione di satelliti.

In ambito europeo la realizzazione del sistema WGS84 è costituito dall' ETRS89 (EUREF Terrestrial Reference System 1989), un sistema solidale con la placca eurasiatica, definito sul terreno da una rete di punti determinati con una compensazione d'insieme delle misure satellitari e spaziali disponibili al 1989.

A livello nazionale il sistema WGS84 è stato realizzato con l'istituzione della rete geodetica tridimensionale di alta precisione, denominata IGM95, rilevata con strumenti di posizionamento GPS differenziale.

Le coordinate del punto Roma Monte Mario nel sistema WGS84 sono:

- latitudine $41^{\circ}55'27,851''$
- longitudine $12^{\circ}27'07,658''$ (da Greenwich)

La rappresentazione piana del sistema WGS84 avviene attraverso il sistema cartografico UTM (*Travaglini, 2004*).

Data la varietà di sistemi di riferimento sviluppati nel corso degli anni, è stato necessario disporre di metodologie che consentono di passare da un sistema all'altro con sufficiente affidabilità.

Vari sono i metodi sviluppati in passato per realizzare la trasformazione di coordinate tra i sistemi di riferimento sopra esposti. Dato che tra questi sistemi non esistono relazioni geometriche semplici, i risultati che si ottengono con i metodi di trasformazione che utilizzano formule generali possono non essere sufficientemente affidabili per le finalità perseguite. In

questi casi si rende necessario il ricorso a metodi empirici stabiliti attraverso il confronto tra le coordinate di punti noti in più sistemi di riferimento (*Arsenio et al., 2002*).

L'esigenza di disporre di metodologie affidabili per la trasformazione di coordinate è indispensabile quando si lavora con sistemi G.I.S.. Per venire incontro a questa esigenza sono stati introdotti sul mercato dei metodi di trasformazione automatica implementati in appositi software che sono specificatamente dedicati al passaggio tra sistemi di coordinate, anche se in realtà rimangono irrisolti i problemi legati all'affidabilità dei risultati.

Nell'ambito di questo lavoro, è stato utilizzato come programma per la trasformazione dei dati tra sistemi di coordinate, il software **TRASPUNTO** sviluppato dal Ministero dell'Ambiente nell'ambito del Progetto Operativo Multiregionale Ambiente. Tale programma, applicato ad un caso reale ha fornito dei risultati più attendibili rispetto agli altri software in commercio (*cf. Travaglini, 2004*).

Par. 3.4. – Visualizzazione dei dati.

Nei Sistemi Informativi Geografici vengono utilizzati due tipi di dati: i **dati spaziali** e i **dati descrittivi** o **attributi**.

I **dati spaziali** (punti, linee e poligoni) forniscono informazioni sulla localizzazione e la forma degli oggetti geografici e possono essere memorizzati come “*layers*” separati nel database geografico. Ciò fornisce la possibilità di visualizzare o tutti gli oggetti presenti nel database oppure solo alcuni di essi. I **dati descrittivi** o **attributi** invece, permettono di comunicare ciò che gli oggetti geografici rappresentano e permettono di identificare un oggetto o un gruppo di oggetti specifici aventi i medesimi attributi (**De Rosa, 2003**).

Lo sviluppo delle tecniche G.I.S. di questi ultimi anni ha portato ad una costante crescita delle **funzioni di analisi** che sono raggruppabili in tre categorie:

1. **Analisi dei dati spaziali** – Tale funzione consente di trasformare i dati, georiferire tra di loro i diversi piani informativi, editare i file e correggere eventuali errori di posizione geografica dei punti.
2. **Analisi degli attributi** - I metodi per accedere agli attributi, si dividono in:
 - *funzioni di “query”*, che effettuano ricerche selettive tra gli attributi delle tabelle e generano nuove tabelle contenenti il risultato, non alterando i dati sorgente;
 - *funzioni di calcolo*, ossia operazioni di tipo aritmetico, logico e matematico sugli attributi.
3. **Analisi integrata dei dati spaziali e degli attributi** – In tal caso è possibile definire quattro categorie:
 - a. *funzioni di ricerca, classificazione e misura*;
 - b. *funzioni di incrocio e/o sovrapposizione di più livelli informativi (overlay)* al fine di ottenerne di nuovi aventi modifiche informative (a livello aritmetico, o logico) degli attributi;
 - c. *funzioni di vicinanza (neighbourhood)*, che valutano le caratteristiche di un’area intorno ad una specifica posizione;
 - d. *funzioni per la verifica della connettività*, distinte in:
 - contiguità;
 - prossimità (*buffering*, usata ad es. per valutazioni d’impatto ambientale);
 - diffusione (*spread*, usata ad es. per l’inquinamento);
 - ricerca (*seek*, usata ad es. per la ricerca del tragitto ottimale);

- analisi di rete.

Per garantire un funzionamento efficiente dei G.I.S. è necessaria una generale standardizzazione dell'organizzazione dei dati ed il riferimento ad uno stesso sistema cartografico. *(Caprioli, 2006)*

Le tecniche di visualizzazione offerte dalle tecnologie G.I.S. hanno ormai raggiunto un livello di affidabilità e chiarezza che si è concretizzato nella possibilità di visualizzare i dati persino in un sistema tridimensionale *(Caiaffa, 2006)*.

Il risultato di una interrogazione di un *database* territoriale è costituito dalle *carte tematiche* che costituiscono lo strumento più efficace per filtrare e rappresentare temi che hanno un rapporto geometrico o spaziale preciso con le diverse entità geografiche. Esse sono uno strumento molto potente che permette di ottenere nuovi tematismi a partire da un tematismo di origine (capostipite) utilizzando i campi disponibili nel database, avendo come base la cartografia ordinaria a scala piccola, media o grande, a seconda delle esigenze.

Il numero dei soggetti che possono essere rappresentati per mezzo di carte tematiche è naturalmente inesauribile; se si pensa poi che la possibilità di scelta di scale differenti, di raffigurare fenomeni generalizzando o schematizzando, scegliendo simboli o tecniche di rappresentazione e riproduzione diverse è vastissima e si comprende subito come non sia possibile elencare tutte le carte tematiche oggi usate nel mondo. Elemento indispensabile per la comprensione delle carte è la "legenda", che servirà da strumento di lettura. Ovviamente è indispensabile un'equa correlazione temporale fra la base cartografica e le informazioni tematiche: *una carta non aggiornata non serve*, o quantomeno falsa il contenuto sovraimpresso.

Importanti esempi di carte tematiche sono le carte geologiche e geomorfologiche, le carte dei rischi geologici, etc. Sotto quest'aspetto i G.I.S. sono più di semplici strumenti utili a gestire e mappare dati spaziali per ottenere tematismi derivati come le carte di vulnerabilità, pericolosità e rischio: essi inoltre possono avere la funzione di sistemi di supporto alle decisioni operative *(Protezione Civile, 2006)*.

Par. 3.5 – Il software utilizzato

La costruzione del sistema informativo territoriale relativo al bacino del Tusciano ha comportato l'uso di un software che permettesse di “elaborare” i dati raccolti, uniformare i sistemi di riferimento, incrociare strati informativi, uniformare le scale ecc.

Il software che ha permesso di realizzare ciò è stato *ArcView GIS 3.2* della ESRI. Per la costruzione del sistema informativo geografico sono stati trattati sia *dati vettoriali* (ad esempio: limiti del bacino, idrografia, localizzazione stazioni pluviometriche, ecc.) che *dati raster* (come il modello digitale del terreno, la distribuzione dei vari fattori della RUSLE sul territorio, ecc).

Per ciascuno strato informativo, *layer*, è stato realizzato un database associato nel quale erano riportate le informazioni relative a quell'elemento.

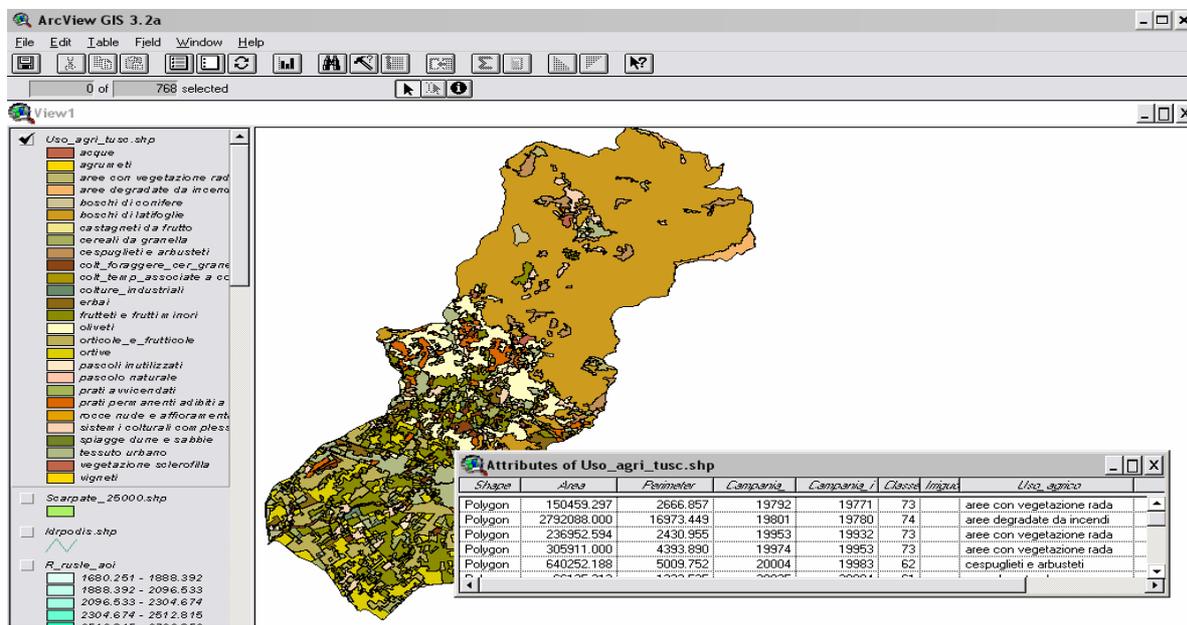


Fig. 3.11: Esempio di carta tematica con visualizzazione degli attributi

Le funzioni e le potenzialità del software sono numerose; in questo ambito saranno presentate solo tre delle funzioni maggiormente utilizzate nell'ambito del presente lavoro.

Una delle funzioni del software più utilizzata è stata quella di *GeoProcessing* che ha permesso di ricavare i dati relativi all'area oggetto di studio da database contenenti dati relativi ad una zona più ampia. È stata ricavata in questo modo la *carta dell'uso agricolo del suolo*, estrapolata dalla carta realizzata a livello regionale, il *modello digitale del terreno* ricavato da un'area più ampia, le *immagini da satellite* utilizzate per il calcolo del fattore C della RUSLE, i *parametri tessiturali del suolo*, utilizzati per il calcolo del fattore K ed estrapolati dalla *carta dei suoli*

1:50000, lotto CPI, Suoli della Piana in Destra Sele realizzata dal Servizio Agricoltura della Regione Campania.

L'altra funzione rivelatasi fondamentale è stata quella di *Map Calculator* tramite la quale è stato possibile effettuare operazioni sui dati raster per ottenere informazioni nuove.

È questa la funzione utilizzata nell'ottenimento del *fattore topografico LS* a partire dal modello digitale del terreno, per la *stima del fattore C* della RUSLE tramite l'uso del NDVI (cfr. par. 4.5.) a partire dalle immagini da satellite, per la *stima finale della quantità di suolo eroso*, e per la stima della diminuzione dell'erosione a seguito dell'applicazione di una semplice pratica antierosiva.

La produzione delle carte tematiche, tra cui quella finale di erosione del bacino, è stata effettuata con la funzione *Layout* grazie alla quale è stato possibile impostare la "grafica" della carta.

La possibilità di "esportare" la carta finale come immagine, ha permesso di ottenere molte delle figure inserite nel presente lavoro.

CAPITOLO 4

APPLICAZIONE DELLA RUSLE AL BACINO PILOTA

Par. 4.1. – La struttura della RUSLE

Il modello RUSLE è un modello empirico, basato su dati sperimentali, che permette di stimare la velocità media di perdita di suolo dovuta all'erosione superficiale (*sheet erosion*) e incanalata (*rill erosion*). L'applicazione di tali equazioni conduce ad una stima della perdita di suolo che tiene conto dell'influenza dei principali quattro fattori (clima, suolo, topografia e uso del suolo) sull'erosione idrica.

La RUSLE è largamente utilizzata dalla comunità scientifica internazionale come strumento utile nella definizione dei piani di conservazione del suolo. Il valore calcolato di perdita di suolo va poi confrontato con il valore di tolleranza di perdita di suolo. In relazione a ciò, una pratica di conservazione è considerata accettabile se la perdita di suolo corrispondente alla specifica pratica è minore del valore di perdita di suolo tollerata (*Angima et al., 2003*).

La vasta diffusione della RUSLE è dovuta agli ottimi risultati che permette di ottenere anche se confrontati con dati rilevati sperimentalmente. Anche per l'analisi del rischio di erosione del bacino del fiume Tusciano è stata utilizzata la RUSLE in modo da individuare le aree maggiormente a rischio.

A partire dall'equazione universale di erosione del suolo di Wischmeier e Smith (1978), rappresentata dalla formula:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

i cinque fattori che portano alla determinazione del suolo eroso (A), sono stati calcolati a partire dai dati a disposizione per il bacino, alcuni in modo completo, altri ottenuti per estrapolazione, altri approssimati (fig.4.1).

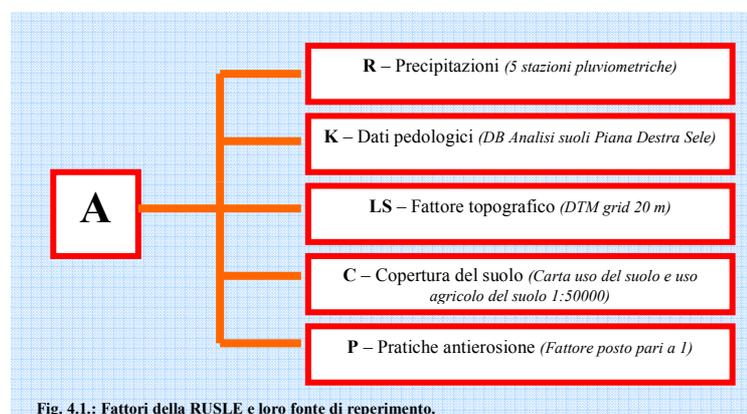


Fig. 4.1.: Fattori della RUSLE e loro fonte di reperimento.

Par. 4.2. – L'erosività della pioggia, R

Secondo la definizione di Wischmeier e Smith (1978), il calcolo del fattore R, che rappresenta l'erosività della pioggia (espresso in MJ mm / h ha anno), comporta delle difficoltà insite sia nella procedura stessa che nella modesta informazione pluviografica che spesso caratterizza l'area di studio. Per tale ragione sono stati proposti modelli di calcolo semplificati che stimano il valore di R a partire da parametri reperibili con maggiore facilità (*Francesse et al., 2005*).

In questo studio il calcolo di R è stato effettuato utilizzando un modello di calcolo semplificato, sfruttando i dati a disposizione per le stazioni pluviometriche di Acerno, Battipaglia, Campagna, Eboli e Giffoni Valle Piana che assicurano una copertura abbastanza omogenea per l'area del bacino del fiume Tusciano.

Già dal 1977, *Roose* aveva proposto una semplice relazione tra il fattore R annuale e la piovosità media annuale, P:

$$R = [(0,5 \pm 0,05)P]$$

in cui R è espresso in unità anglosassoni (foot tonf inch / acre h year) e P è espressa in inch.

Nello stesso anno *Arnoldus*, esaminando l'indice di Fournier ($\sum p_i^2 / P$) - in cui p è la piovosità media dei mesi con piovosità più alta e P la piovosità media annua - trovò una scarsa correlazione con i valori di R per 178 stazioni tra USA e Africa Occidentale e propose un **indice di Fournier modificato**:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P}$$

indicando con p_i la precipitazione media mensile e con P la precipitazione media annua. Continuando nei suoi studi in Marocco, *Arnoldus* (1977) trovò anche una relazione che lega l'indice di Fournier modificato e il fattore R:

$$R = 0,264 F^{1,50}$$

in cui F è espresso in mm ed R è espresso in ton cm ha⁻¹ h⁻¹ y⁻¹

Risale agli anni '80 anche la relazione proposta da *Lo et al. (1985)*, sulla base di studi effettuati alle Hawaii. Anche in questo caso il fattore R è, secondo l'autore, meglio stimato dalla piovosità media annua tramite la relazione:

$$R = 38,46 + 3,48 P$$

Con R espresso in cN/h e P in mm.

Degna di nota è altresì la relazione proposta da *Renard e Freimund (1994)*, ricavata in base ai dati di 155 stazioni statunitensi. Anche in questo caso la relazione sfrutta la piovosità media annua ed ha la seguente formulazione:

$$R = 0,0483 P^{1,61}$$

con R in MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ y⁻¹ e P in mm/anno. Tale relazione è utilizzabile nel caso di stazioni con piovosità media annua <850 mm. Nel caso in cui tale parametro superi gli 850 mm di pioggia la relazione da utilizzare è, invece:

$$R = 587,8 - 1,219P + 0,004105 P^2 \quad [1]$$

La relazione [1] è stata utilizzata nel caso del bacino del Tusciano, caratterizzato da una precipitazione media annua molto più elevata di 850 mm (in media ~ 1450 mm). I risultati relativi alla stima di R con la formula [1] sono stati riportati nella tabella 4.1.

Altre relazioni sono state proposte dallo stesso autore e prevedono, per la stima di R, l'indice modificato di Fournier, e sono le seguenti:

$$R = 0,07397 F^{1,847}$$

con F espresso in mm. Tale relazione è utilizzabile per le stazioni aventi F < 55 mm.

Per le stazioni in cui F supera i 55 mm, la relazione trovata dagli autori è la seguente:

$$R = 95,77 - 6,081F + 0,4770F^2$$

In Italia, studi sulle possibili relazioni utilizzabili per la stima di R risalgono agli inizi degli anni '80 e furono realizzati da *D'Asaro e Santoro (1983)*. Nell'ambito di studi sull'erosione idrica del territorio siciliano, gli autori proposero la seguente relazione utilizzabile per la stima del fattore R per le zone non servite da pluviografi ma solo da stazioni pluviometriche:

$$R = 0,21 q^{-0,096} P^{2,3} NGP^2 \quad [2]$$

in cui R è l'erosività media annua della pioggia espressa in unità anglosassoni (hundred of foot tonf inch acre-1 hour-1), q rappresenta la quota della stazione pluviometrica in m s.l.m. e NGP è il numero di giorni piovosi.

Per ottenere la stima di R in MJ mm ha⁻¹h⁻¹ bisogna moltiplicare per un fattore di conversione pari a 17,02 (*Bagarello e Ferro, 2006*). I risultati sono riportati nella tab. 4.1.

Un ulteriore studio su gran parte del territorio italiano per la stima dell'indice di aggressività della pioggia è stato effettuato da *Diodato (2004)*.

L'autore stima il parametro *EI₃₀* (*indice erosivo annuale empirico*) su scala annuale per le regioni italiane caratterizzate da un regime di pioggia mediterraneo. In Italia, infatti, il clima mostra marcate caratteristiche mediterranee lungo la costa, mentre nelle zone più interne

assume condizioni continentali, in cui a periodi di estate secca seguono dei massimi di pioggia nella metà di autunno e una graduale diminuzione nel periodo primaverile. È proprio questo il caso del bacino del fiume Tusciano.

Nel suo studio Diodato prende in considerazione 12 stazioni pluviometriche italiane (tra cui una, Pontecagnano A.M., ricadente nel bacino oggetto del nostro studio) per le quali si registra un regime di pioggia mediterraneo e 5 stazioni addizionali per validare i risultati ottenuti.

Dagli studi effettuati, l'autore perviene alla formula seguente per il calcolo del valore di EI_{30} su base annuale:

$$EI_{30\text{-annual}} = 12,142 \times (abc)^{0,6446}$$

In cui: $EI_{30\text{-annual}}$ è l'indice erosivo annuale empirico, espresso in MJ mm ha⁻¹h⁻¹; a = precipitazione totale annua (in cm), b = piovosità massima giornaliera nell'anno (in cm), e c = massima precipitazione oraria nell'anno (in cm).

La stima del valore di EI_{30} su base annuale, richiede la conoscenza di sole tre variabili che, per le stazioni ricadenti nella nostra area di studio, sono riportate negli Annali Idrologici pubblicati dall'Ufficio Idrografico e Mareografico di Napoli.

Il valore di R in base ai dati ottenuti può, quindi, essere valutato come:

$$R = \frac{1}{N} \sum_1^N EI_{30\text{-annual}} \quad [3]$$

dove N è il numero di anni di osservazione.

Altre formule per la stima di R si ritrovano in letteratura con applicazioni in varie parti del mondo e a partire da parametri diversi (*Yu & Rosewell, 1996; de Santos Loureiro & de Azevedo Coutinho, 2001*), per cui per scegliere la formula da applicare si può spaziare in una letteratura abbastanza ampia.

Nell'allegato 6 sono stati riportati i dati relativi alle 5 stazioni pluviometriche citate mentre la tab. 4.1. riporta le elaborazioni effettuate ed i valori di R ottenuti per ogni singola stazione, applicando le formule [1],[2] e [3] che sembrano essere le più attendibili per l'ampia base sperimentale.

Tab. 4.1 – Calcolo del fattore R, aggressività della pioggia, effettuato con diverse metodologie.

Stazione	Fattore R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹) (Diodato, 2004)	Fattore R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹) (Renard & Freimund, 1994)	Fattore R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹) (D'Asaro & Santoro, 1983; Bagarello e Ferro, 2006)
ACERNO	3553,52	12519,31	4609,02
BATTIPAGLIA	1680,25	4348,74	2930,84
CAMPAGNA	2780,52	9826,43	4726,45
EBOLI	2042,36	4942,59	2980,20
GIFFONI VALLE PIANA	2915,61	7257,90	3858,43

L'elevata variabilità nella definizione del parametro R tra il valore ottenuto con la formula di *Renard & Freimund (1994)* e quello calcolato con la formula di *Diodato (2004)*, è stata attribuita al fatto che le relazioni ottenute dagli autori derivano da studi effettuati in luoghi diversi, con regimi climatici diversi e quindi “susceptibili” alle caratteristiche degli ambienti in cui sono state determinate.

Anche i valori ricavati applicando la formula di *D'Asaro e Santoro (1983)*, risultano più alti di quelli ricavati applicando la formula di *Diodato*, anche se presentano una minore variabilità rispetto al valore ottenuto con la formula di *Renard & Freimund*, probabilmente per il “particolare” regime climatico che caratterizza l'ambiente siciliano. Dunque, per i motivi citati, nel presente lavoro è stato ritenuto opportuno utilizzare la formula di *Diodato (2004)* per il calcolo dell'erosività della pioggia in quanto ricavata per condizioni climatiche analoghe alla zona di interesse e validata in una stazione ricadente proprio nell'area di studio (Pontecagnano A.M.).

I dati puntuali, riferiti alle 5 stazioni pluviometriche, sono stati interpolati con la funzione IDW (Inverse Distance Weight) di *ArcView* che ha permesso di ottenere una stima del valore di R relativa a tutto il bacino. Il risultato ottenuto è riportato in fig. 4.2.

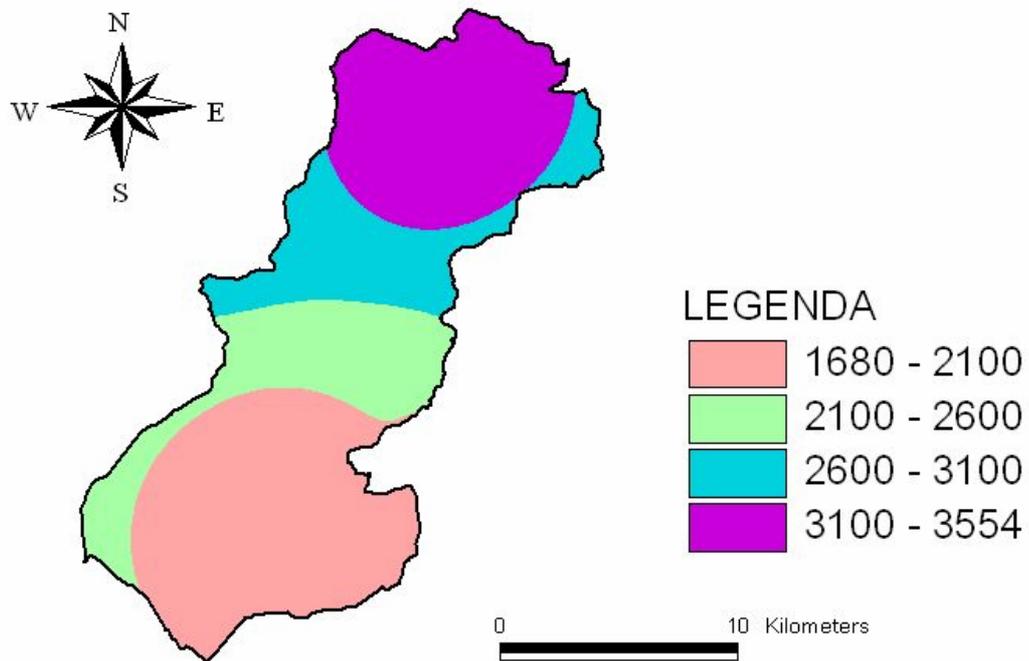


Fig. 4.2: Stima del fattore R per il bacino del fiume Tusciano. (I valori sono espressi in $MJ mm ha^{-1} h^{-1}$)

Il valore medio di erosività da pioggia per il bacino è pari a $2534 MJ mm ha^{-1} h^{-1}$, che indica un territorio soggetto ad un'erosività della pioggia alquanto elevata.

L'erosività massima è stata riscontrata nel settore montano del bacino mentre valori più bassi sono stati riscontrati nel settore vallivo.

Par. 4.3. – L'erosibilità del suolo, K

Il fattore K riflette la facilità con cui il suolo viene staccato dalle gocce di pioggia durante un evento meteorico e/o dal flusso superficiale. È dunque un fattore legato all'effetto integrato di pioggia, ruscellamento e infiltrazione e tiene conto dell'influenza delle proprietà del suolo sulla quantità di suolo perso su un versante durante un evento piovoso. Per la determinazione del fattore K per suoli tropicali sono utilizzati gli aggregati di suolo instabili, il limo modificato, la sabbia e la corrispondente saturazione di base (*El-Swaify & Dangler, 1976*). L'erosibilità è dunque una specifica proprietà del suolo che è influenzata da fattori quali la tessitura del suolo, il contenuto di sostanza organica, la struttura e la permeabilità.

L'erosibilità del suolo aumenta con l'incremento del contenuto di limo e sabbia fine del suolo, mentre decresce con l'aumento del contenuto di argilla e materiale organico (*Renard et al., 1997*).

In fig. 4.3 viene definita la granulometria del suolo secondo la classificazione USDA:

CLAY	SILT	SAND					GRAVEL
		Very Fine	Fine	Medium	Coarse	Very Coarse	
0.002	0.05	0.1	0.25	0.5	1.0	2.0	

Fig. 4.3 – Classificazione delle particelle di suolo in relazione alla misura (espressa in mm)
Fonte: <http://www.cr.nps.gov/seac/soilsmanual/lists.htm>

Studi di laboratorio hanno mostrato, infatti, che particelle medie e grossolane sono facilmente distaccate dalla massa di suolo mentre le particelle di argilla resistono al distacco. Ciò può essere attribuito al fatto che le particelle argillose necessitano di una maggiore energia per vincere le forze coesive che le tengono unite. Dunque i suoli con alti contenuti di limo e scarsi di argilla sono altamente erodibili (*Renard et al., 1997*).

Wischmeier e Mannering (1969) osservarono che l'erosibilità decresce al diminuire del contenuto di limo, indipendentemente dal corrispondente incremento di sabbia o frazione argillosa. L'alta erodibilità dei suoli limosi è spiegata dalla loro debole stabilità strutturale. Essi, infatti, formano rapidamente, a seguito dell'impatto delle gocce di pioggia, delle superfici impermeabili. Sui suoli argillosi, invece, si riscontra una minore erosione in quanto questi ultimi presentano una maggiore aggregazione.

Nel caso dei suoli sabbiosi, i larghi pori tra le particelle di sabbia permettono un rapido movimento dell'acqua e, quindi, una riduzione dell'erosione del suolo.

Per quanto detto, è possibile affermare che l'erosività in genere aumenta con l'incremento della frazione limosa e della sabbia molto fine e diminuisce all'aumentare del contenuto di sostanza organica, come si può osservare dalla tabella 4.2 preparata dall'Agricultural Research Service degli USA (1975).

Tab. 4.2 : Valori di K (in ton acre hour/hundred of acre foot tonf inch) in funzione della tessitura e della sostanza organica (ARS-USA, 1975)

TESSITURA	CONTENUTO IN SOSTANZA ORGANICA		
	< 0,5%	2%	4%
<i>Sabbia</i>	0,05	0,03	0,02
<i>Sabbia fine</i>	0,16	0,14	0,10
<i>Sabbia molto fine</i>	0,42	0,36	0,28
<i>Franco sabbioso</i>	0,12	0,10	0,08
<i>Franco sabbioso fine</i>	0,24	0,20	0,16
<i>Franco sabbiosa molto fine</i>	0,44	0,38	0,30
<i>Sabbioso franco</i>	0,27	0,24	0,19
<i>Franco</i>	0,38	0,34	0,29
<i>Limoso franco</i>	0,48	0,42	0,33
<i>Limoso</i>	0,60	0,52	0,42
<i>Argilloso franco</i>	0,28	0,25	0,21
<i>Sabbioso argilloso</i>	0,14	0,13	0,12
<i>Limoso argilloso</i>	0,25	0,23	0,19
<i>Argilloso</i>	0,13-0,29		

Per la *determinazione sperimentale del fattore K*, è necessario disporre di una parcella standard che deve essere lavorata e mantenuta priva di vegetazione (maggese nudo) per almeno due anni prima di effettuarvi le misure di perdita di suolo. Successivamente, durante la fase sperimentale, la parcella viene annualmente arata, sistemata (preparazione del letto di semina) come se dovesse essere seminata e soggetta a lavori complementari per impedire la crescita della vegetazione spontanea e per rompere l'eventuale crosta superficiale.

Nelle condizioni esposte, il fattore di erodibilità del suolo (K) esprime l'attitudine intrinseca del suolo ad essere eroso ed è definito come il tasso di erosione per unità dell'indice R relativo ad una parcella standard (lunga 22,13 m e con pendenza 9%) lavorata a maggese nudo, nel senso della massima pendenza (a rittochino). In tali condizioni il valore dei fattori lunghezza (L), pendenza (S), copertura vegetale (C) e pratiche antierosive (P) è uguale ad 1 e pertanto il valore di K è determinato dal rapporto tra la perdita di suolo misurata e l'erosività della pioggia ($K=A/R$).

Affinché il valore dell' erodibilità risulti rappresentativo delle diverse caratteristiche pluviometriche, delle variabili condizioni fisiche e chimiche del suolo nei vari periodi stagionali e delle differenti condizioni di umidità del momento in cui si verificano gli eventi piovosi erosivi, detto valore deve essere mediato su un periodo di tempo sufficientemente lungo.

Per le ragioni sopra indicate, la determinazione sperimentale del fattore K richiede molto tempo ed è inoltre costosa. Per ovviare a tale inconveniente *Wischmeier e Mannering (1969)* presero in esame 15 caratteristiche del suolo maggiormente correlate con l'erosione e ne derivarono un'equazione che, però, per il numero dei termini che la componevano, risultò di scarso valore applicativo.

Tali considerazioni consentirono successivamente (*Wischmeier et al., 1971*) di mettere a punto un nomogramma, facilmente utilizzabile, per la valutazione dell'erodibilità.

L'utilizzazione del nomogramma richiede infatti soltanto la conoscenza delle seguenti caratteristiche del terreno:

- * Somma della percentuale di limo (0,002 -0,05 mm) e sabbia molto fine (0,05 -0,10 mm);
- * Percentuale di sabbia (0,10-2 mm);
- * Percentuale di sostanza organica;
- * Struttura;
- * Permeabilità.

Le classi tessiturali in base alla classificazione americana (USDA) con l'inclusione della sabbia molto fine (0,05 - 0,10 mm) nel limo sono le seguenti:

- ✓ granulare molto fine;
- ✓ granulare fine;
- ✓ granulare media o grossolana;
- ✓ poliedrica, lamellare o massiva.

La *permeabilità* invece si riferisce alla seguente classificazione:

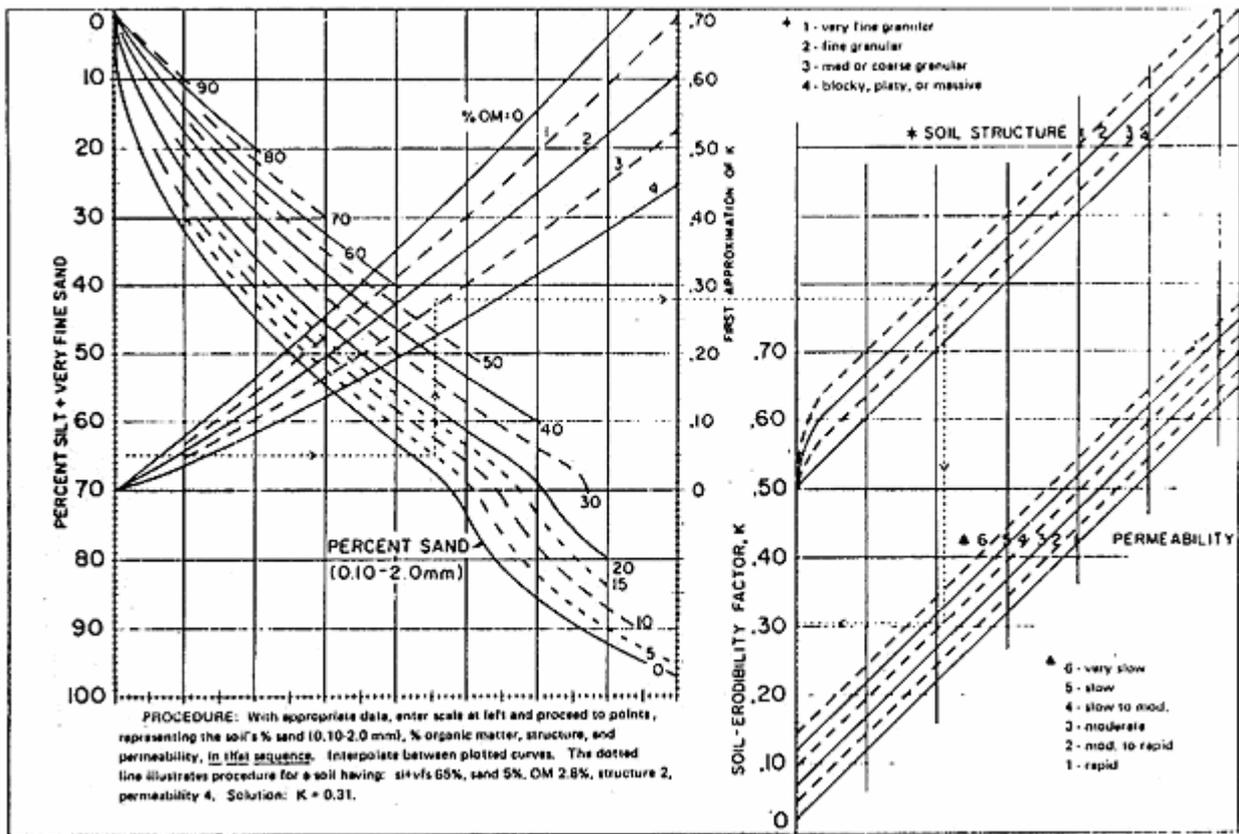
- rapida (> 12.7 cm/h);
- da moderata a rapida ($> 6.4 - < 12,7$ cm/h)
- moderata ($> 2.0 - < 6.4$ cm/h)
- da lenta a moderata ($> 0,5 - < 2,0$ cm/h)
- molto lenta (< 0.1 cm/h).

Noti i valori su citati, è possibile ricavare per via grafica il valore di K (cfr. fig. 4.4) riportando sul nomogramma la percentuale di limo e sabbia molto fine e procedendo orizzontalmente

verso destra fino ad incontrare la curva corrispondente alla percentuale di sabbia. Si procede quindi verticalmente fino ad incontrare la curva della percentuale di sostanza organica e da questa, muovendosi orizzontalmente verso destra, fino ad incontrare la curva corrispondente al codice di struttura.

Sul bordo destro del primo settore del grafico si può leggere un *valore approssimativo di K*. Dal punto di incrocio con una delle curve della struttura si traccia una retta verticale, verso il basso, fino ad incontrare una delle curve della permeabilità e da questo punto si procede orizzontalmente verso sinistra fino ad incontrare l'ordinata posta sulla sinistra del secondo settore del grafico dove si legge il valore dell'erosibilità.

Fig. 4.4: Nomogramma per la valutazione dell'indice di erodibilità K. (Wischmeier e Smith, 1978). Le unità di K sono relative alle unità originali di R (Foot-tons/acre-inch). Se il valore di R è espresso in unità metriche e S.I. (t metriche/ha cm) il valore ottenuto va moltiplicato per il fattore di conversione 1,3. Le caratteristiche degli aggregati e della permeabilità sono riferite al Soil Survey Manual (1951).



La stima di K derivante dall'uso del nomogramma proposto da *Wischmeyer e Smith (1978)* è applicabile ad un vasto territorio degli USA, ma risulta molto meno accurata quando applicata in parti diverse ed a suoli con particolari caratteristiche (*Römken et al., 1986*).

Il valore del fattore K ricavato dal nomogramma, infatti, trova una buona applicazione a suoli tropicali che hanno caolinite come minerale argilloso dominante, ma è meno applicabile dove dominano i Vertisuoli (*Roose, 1977*).

El-Swaify & Dangler (1976) hanno sviluppato una procedura per il calcolo di K per suoli tropicali che utilizza come dati le percentuali modificate di limo e sabbia, la saturazione di base, la percentuale degli aggregati instabili e la percentuale di sabbia molto fine. L'equazione proposta è la seguente:

$$K = -0,03970 + 0,00311 X_1 + 0,00043 X_2 + 0,00185 X_3 + 0,00258 X_4 - 0,00823 X_5$$

in cui:

- X_1 è la percentuale degli aggregati instabili <0,250 mm;
- X_2 è il prodotto della percentuale di limo (0,002-0,01 mm) e sabbia (0,1-2 mm) presenti nel campione;
- X_3 è la saturazione di base percentuale del suolo;
- X_4 è la percentuale di limo presente (0,002 – 0,050 mm)
- X_5 è la percentuale di sabbia (0,1-2 mm) presente nel suolo

Il risultato di tale equazione è espresso in ton acre h /hundreds of acre foot tonf inch, pertanto il risultato è diviso per 7,59 in modo da ottenere il valore equivalente espresso in Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ (*El Swaify e Dangler, 1976*).

Di più vasta applicabilità è la formula proposta da *Renard et al. (1997)* che deriva da studi effettuati su 225 classi di suoli a scala globale. L'equazione proposta è la seguente:

$$K = \left\{ 0,0034 + 0,0405 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log(D_g) + 1,659}{0,7101} \right)^2 \right] \right\} \quad [4]$$

con K espresso in Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ e la media geometrica delle dimensioni delle particelle (D_g) espresso dalla relazione:

$$D_g = \exp(0,01 \sum f_i \ln m_i)$$

in cui: D_g = media geometrica delle dimensioni delle particelle (in mm); f_i = valore percentuale della frazione di particelle di suolo comprese nella i-esima classe; m_i = media aritmetica del diametro delle particelle comprese nella i-esima classe. Tale fattore quindi vale:

- per la sabbia: $(2+0.05)/2=1.025$;
- per il limo: $(0.05+0.002)/2=0.026$;
- per l'argilla: $(0.002+0.00005)/2=0.001$.

Anche in questo caso, moltiplicando la [4] per il fattore 7,594 si ottiene il valore di K espresso in unità anglosassoni.

Nel caso del bacino del fiume Tusciano, si è fatto riferimento alla carta del suolo in scala 1:50.000, lotto CP1, Suoli della Piana in Destra Sele, realizzata dal Settore SIRCA della Regione Campania. Per la parte valliva del bacino sono disponibili 10 profili di suolo per i quali sono state effettuate, tra l'altro, le stime dei parametri necessari alla valutazione del fattore di erodibilità (K).

In tab. 4.3 sono stati riportati oltre che i parametri relativi alla granulometria del suolo (% media di sabbia, limo e argilla), anche il carbonio organico medio (in g/kg), il pH medio e la densità apparente media (in g/cm³), quest'ultima non per tutti i profili. Il valore medio di questo parametro (1,07 g/cm³), tuttavia, sarà utilizzato successivamente per ottenere una stima della quantità di suolo che viene eroso. Tutti i parametri indicati derivano da una media dei valori relativi allo strato superficiale ed a quello profondo dello stesso profilo. L'ultima colonna riporta il valore di K calcolato con la formula [4] espresso in Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹.

La stima del fattore K per la parte collinare e montana del bacino è stata effettuata per estrapolazione dei dati della parte valliva. Tale decisione è stata presa anche sulla base della carta delle coperture piroclastiche del bacino, in scala 1:25000, fornita dall'Autorità di Bacino in Destra Sele (cfr. fig. 4.5) che mostra una copertura della parte montana e pedemontana di almeno 20-30 cm di suolo, che sono in realtà coinvolti nel fenomeno di erosione idrica superficiale.

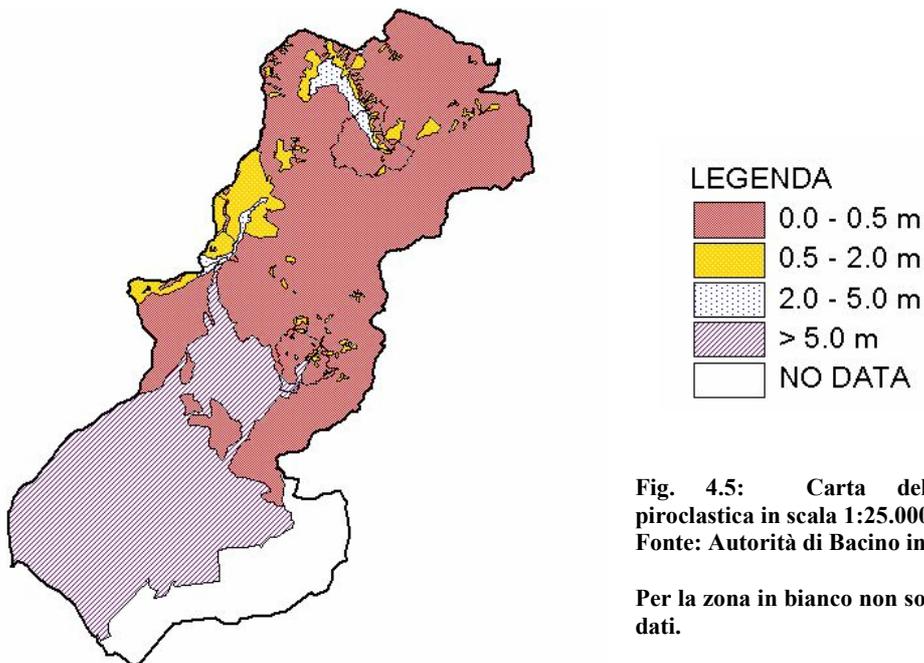


Fig. 4.5: Carta della copertura piroclastica in scala 1:25.000.
Fonte: Autorità di Bacino in Destra Sele.

Per la zona in bianco non sono disponibili i dati.

Tab. 4.3: Parametri estratti dalla carta dei suoli 1:50000, lotto CP1, Suoli della Piana in Destra Sele, Settore SIRCA, Regione Campania.

ID profilo	Località	Quota (m)	ID Suoli	Substrato pedogenetico	% media sabbia	% media limo	% media argilla	C org medio g/kg	pH medio	Densità apparente media g/cm ³	Fattore K (RUSLE)
CP1P46	BATTIPAGLIA – Loc. Casella	78	Suoli Picciola (PIC0)	Depositi colluviali ed eolici fini	34,8	39,5	25,7	10,8	8	---	0,0412
CP1P38	BATTIPAGLIA – Loc. Camposantillo	8	Suoli Camposantillo (CMP0)	Alluvioni recenti fini e grossolane	49,6	36,4	14	5,7	8,6	---	0,0294
CP1P41	BATTIPAGLIA – Loc. Bosco Grande	27	Suoli Bosco Grande (BGR0)	Depositi alluvionali recenti fini e grossolani	19,3	53,7	27	13	8,7	---	0,0439
CP1P71	BELLIZZI – Loc. Podere Cambiamento	25	Suoli Corvinia (CRV1)	Depositi alluvionali e colluviali fini	35,4	27,9	36,7	3,7	8,2	---	0,0433
CP1P89	BATTIPAGLIA – Loc. Torre dei Ragni	47	Suoli Torre dei Ragni (RAG0)	Sedimenti alluvionali e colluviali fini	25,6	35,4	39	8	7,9	1,09	0,0437
CP1P44	BATTIPAGLIA – Loc. Cifariello	29	Suoli Cifariello (CIF0)	Sedimenti alluvionali e colluviali fini e grossolani	32	50,6	17,4	11,7	8,4	1,25	0,0396
CP1P77	BATTIPAGLIA – Loc. Torre dei Mussi	39	Suoli Torre dei Mussi (MUS0)	Depositi alluvionali e colluviali fini	24,7	42	33,3	11,3	7,6	1,01	0,0439
CP1P50	BATTIPAGLIA – Loc. Casella	78	Suoli Casella (CAE0)	Depositi alluvionali e colluviali fini	24	36,7	39,3	11,3	8	0,99	0,0435
CP1P48	MONTECORVINO ROVELLA – Loc. Longobarda	67	Suoli Longobarda (LON0)	Marne e conglomerati	27	44	29	13	8,1	1,01	0,0435
CP1P54	EBOLI – Loc. Poblenna	40	Suoli Torre dei Ragni (RAG1)	Depositi alluvionali pleistocenici fini	32	22	46	8,5	7,5	---	0,0437

La stima del fattore K per l'intero territorio del bacino è stata ricavata in modo analogo a quanto fatto per il fattore R, sfruttando la funzione di interpolazione IDW di ArcView. Il risultato ottenuto è riportato in figura 4.6 dalla quale si ricava, per il fattore K, un valore medio per il bacino del Tusciano pari a $0,0418 \text{ Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

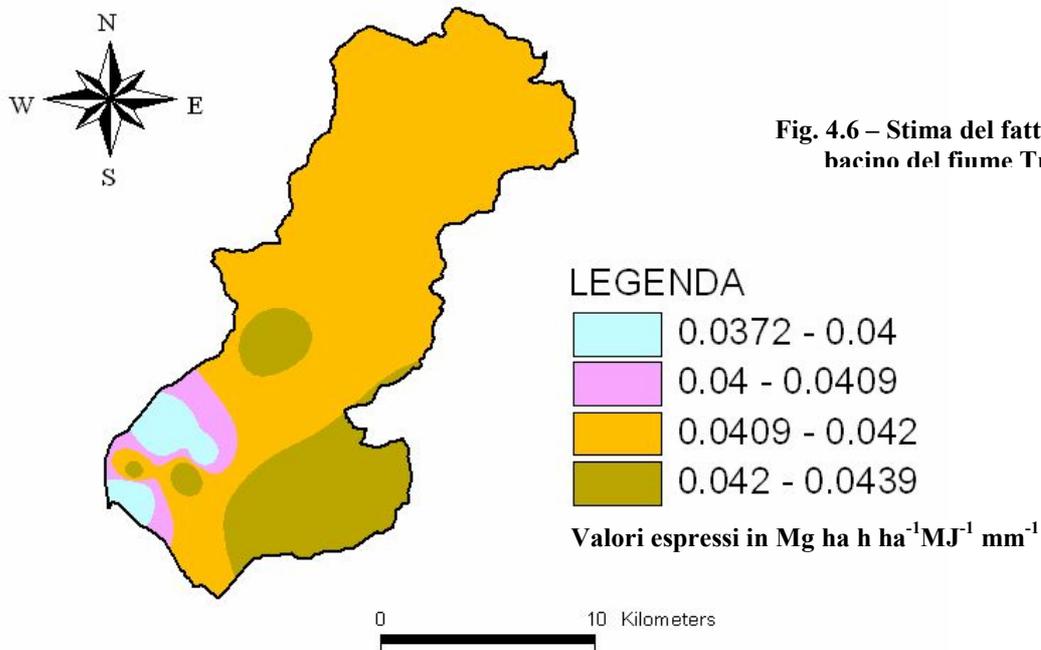
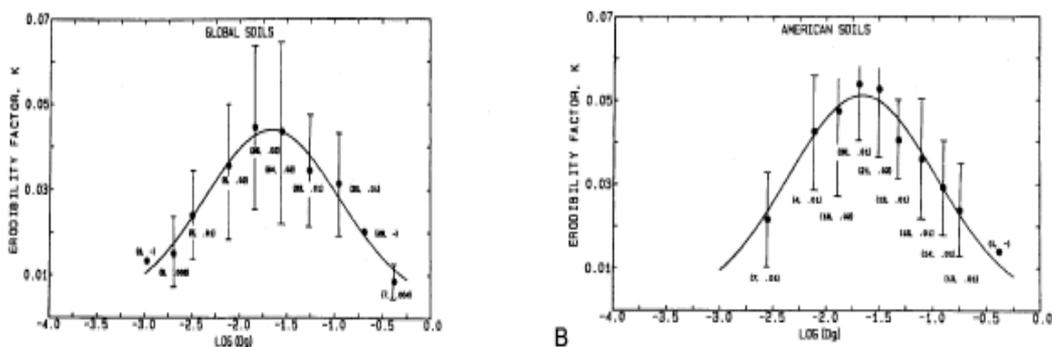


Fig. 4.6 – Stima del fattore K per il bacino del fiume Tusciano

Il valore del fattore di erodibilità ottenuto per il bacino del fiume Tusciano risulta alquanto elevato, indice del fatto che il suolo risulta particolarmente sensibile all'erosione o, comunque, poco resistente; infatti, confrontando i valori ottenuti per i parametri D_g e K con i diagrammi mostrati in fig. 4.7. ottenuti per i suoli di varie parti del mondo (fig. 4.7/A) e per i suoli americani (fig. 4.7/B) (*Renard et al., 1997*) è possibile notare che sia il valore di K ($0,0418 \text{ Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) che il valore del $\log D_g$ (pari a $-1,53$), si trovano nella parte alta della distribuzione normale.



A
Fig. 4.7 – Fattore di erodibilità del suolo (K) in funzione della media geometrica del diametro delle particelle (D_g) espresso in mm. I valori di K sono espressi nel S.I.
La fig. 4.6/A rappresenta dati di suoli globali mentre la fig. 4.6/B rappresenta solo i dati relativi a suoli americani. La linea mostrata in grafico è stata calcolata per classi di D_g medie con distribuzione normale. Le linee verticali rappresentano valori di K per ogni classe $D_g \pm \sigma$. I numeri in parentesi rappresentano il numero di osservazioni e le deviazioni standard per ogni classe di D_g .

Par. 4.4. – Il fattore topografico, *LS*

Il fattore topografico tiene conto degli effetti della lunghezza dei versanti (fattore *L*) e della pendenza degli stessi (fattore *S*) sull'entità dell'erosione che è proporzionale ad entrambi i fattori (*Angima et al., 2003*). La lunghezza del versante è definita come la distanza orizzontale tra l'origine del flusso superficiale ed il punto in cui si verifica una diminuzione di pendenza del versante che provoca un deposito oppure il punto in cui il flusso viene concentrato in una scanalatura definita.

Un incremento della lunghezza e della ripidità del versante provoca una più alta velocità di scorrimento del flusso superficiale e di conseguenza un'erosione maggiore (*Hickey et al., 1994*).

Nella RUSLE, i due fattori vengono inglobati in un unico parametro, denominato fattore topografico, *LS*, e valutati in modo congiunto. Esso rappresenta il rapporto esistente, a parità degli altri fattori, tra le perdite di suolo di un appezzamento di data pendenza e lunghezza rispetto a quelle di un appezzamento "standard" di 22.13 m di lunghezza con il 9% di pendenza (*Renard et al., 1997*). Il valore di detto rapporto, per le diverse combinazioni lunghezza-pendenza, può essere ricavato direttamente utilizzando un apposito grafico (fig. 4.8).

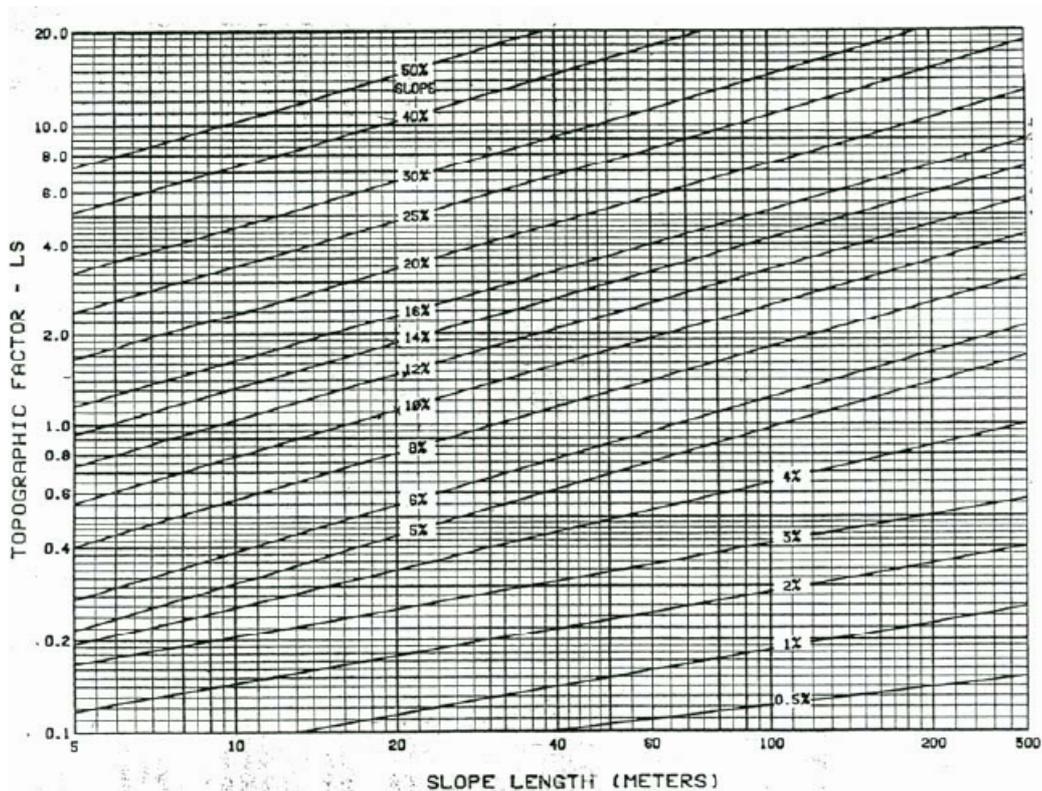


Fig. 4.8 - Grafico da utilizzare per il calcolo del fattore topografico *LS* (Cfr. Zaccagnini, 2001)

Il valore del fattore LS può essere calcolato anche da misure in situ ma, rilevare misure precise per un bacino avente un'ampia estensione (come per il bacino del fiume Tusciano di ca. 260 km²), risulterebbe complesso e dispendioso. Il metodo attualmente più utilizzato per il calcolo del fattore LS prevede, invece, l'uso dei sistemi informativi geografici che permettono di ottenere una stima del fattore LS a partire dal modello digitale del terreno (DTM).

Il modello digitale del terreno (Fig. 4.9) relativo al bacino del Tusciano, è stato fornito dall'Unità di Supporto Locale n.6, Progetto Operativo Difesa Suolo (PODiS) - Regioni Ob.1 (PON ATAS 2000-2006) - Direzione Generale Difesa del Suolo - Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio ed ha una risoluzione di 20m×20m.

La sua elaborazione tramite strumenti GIS ha permesso di ricavare parametri quali la pendenza del bacino (cfr fig. 4.10), la lunghezza del versante (indicata con L, Fig. 4.12/a) e la pendenza del versante (indicata con S, Fig. 4.12/b) oltre al valore del fattore topografico (LS) dato dal rapporto tra gli ultimi due.

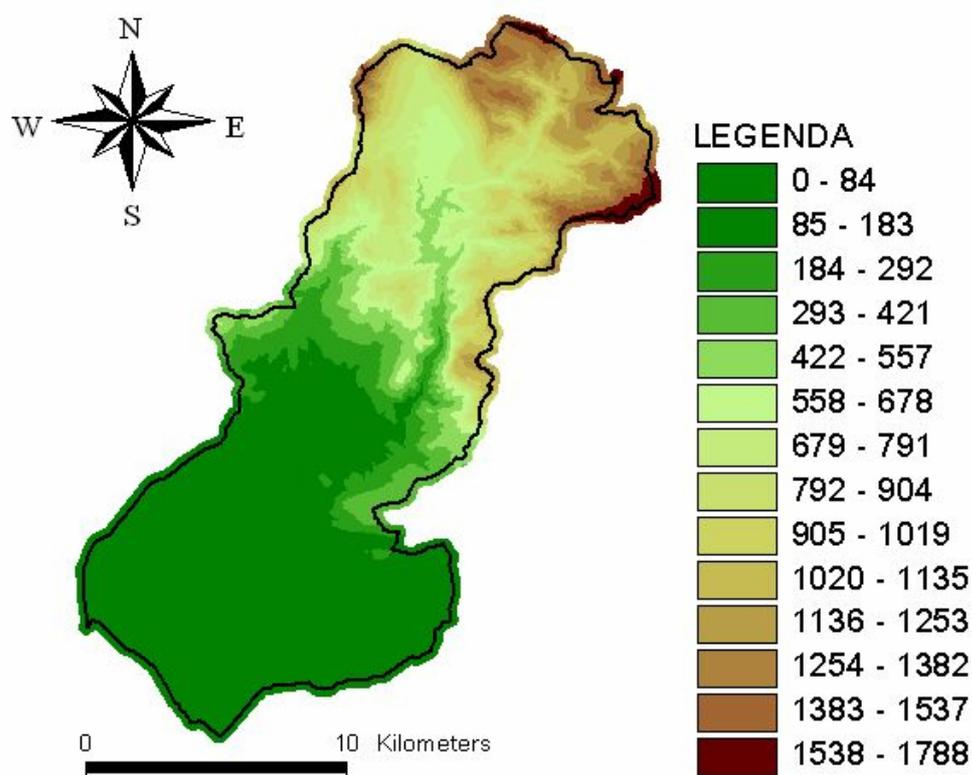


Fig. 4.9 – Modello digitale del terreno risoluzione 20m × 20 m . Fonte: Unità di Supporto Locale n.6, Progetto Operativo Difesa Suolo (PODiS) - Regioni Ob.1 (PON ATAS 2000-2006) - Direzione Generale Difesa del Suolo - Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio

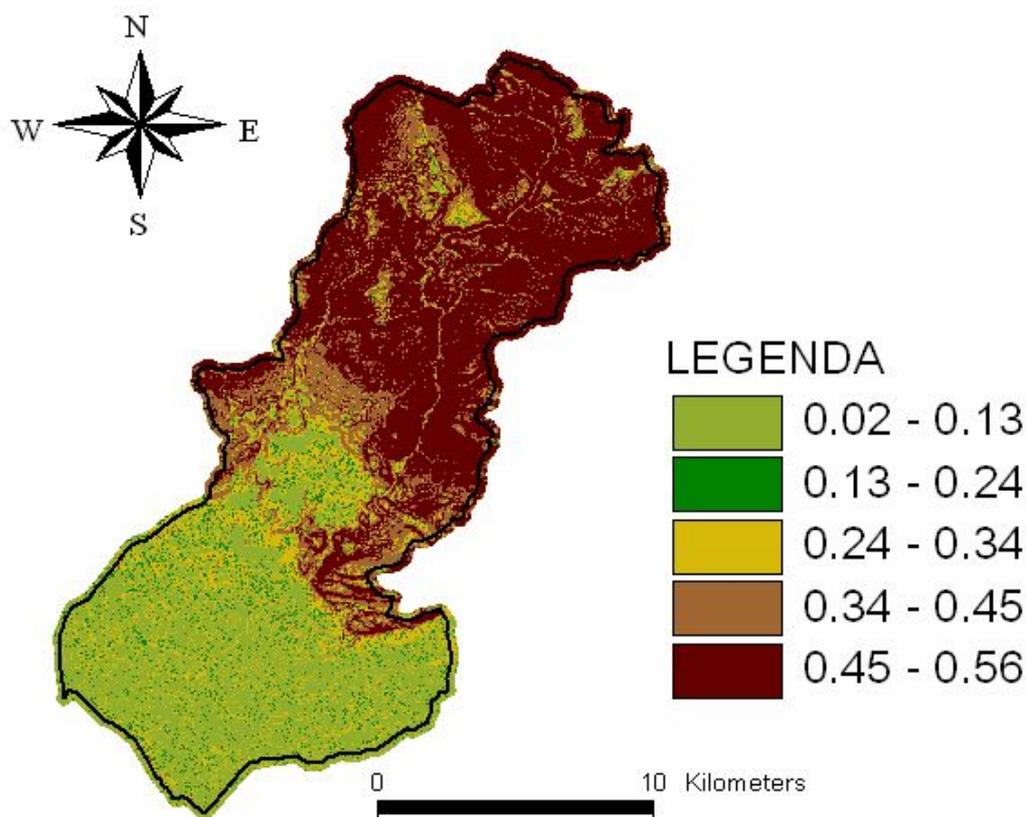


Fig. 4.10 – Carta delle pendenze del bacino del Tusciano

La pendenza del bacino varia dal 2% circa nella parte valliva fino al 56% nella parte montana, con una pendenza media dell'intero bacino pari al 32,2%.

Il procedimento seguito per il calcolo del fattore LS del bacino del Tusciano è quello suggerito da *Van Remortel et al. (2001, 2004)*, che è riepilogato nella fig. 4.11.

Il programma che permette di fare tale tipo di elaborazioni è stato scaricato dal sito (<http://www.cwu.edu/~rhipkey/slope/slope.html>) e, anche se rappresenta ancora un prototipo può essere applicato per il calcolo del fattore LS in modo abbastanza immediato con strumenti GIS. Tale applicativo è stato sviluppato in linguaggio AML (Arc Macro Language) e utilizza i moduli Arc e Grid della ArcInfo™ Workstation versione 8.2 (prodotta dalla ESRI). Esso permette il calcolo del fattore LS per ampie zone e, trattandosi di un processo di tipo reiterativo può richiedere anche molto tempo per zone molto ampie.

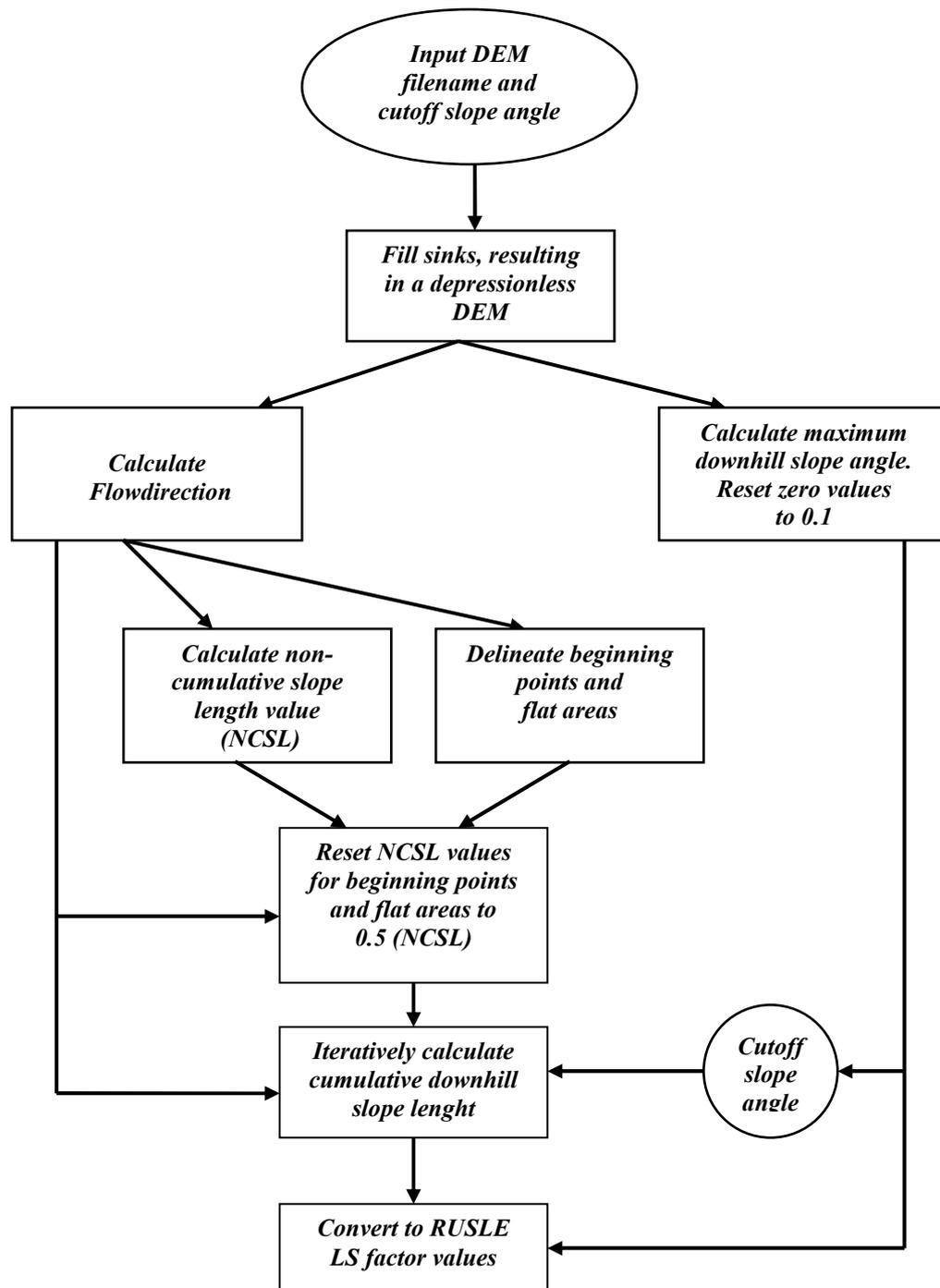


Fig. 4.11: Diagramma di flusso che illustra il processo di calcolo del fattore LS utilizzato nella RUSLE (Van Remortel et al., 2001)

Relativamente ai due fattori coinvolti nella determinazione del fattore topografico (L e S) le due distribuzioni lungo il bacino sono riportate nelle figure seguenti:

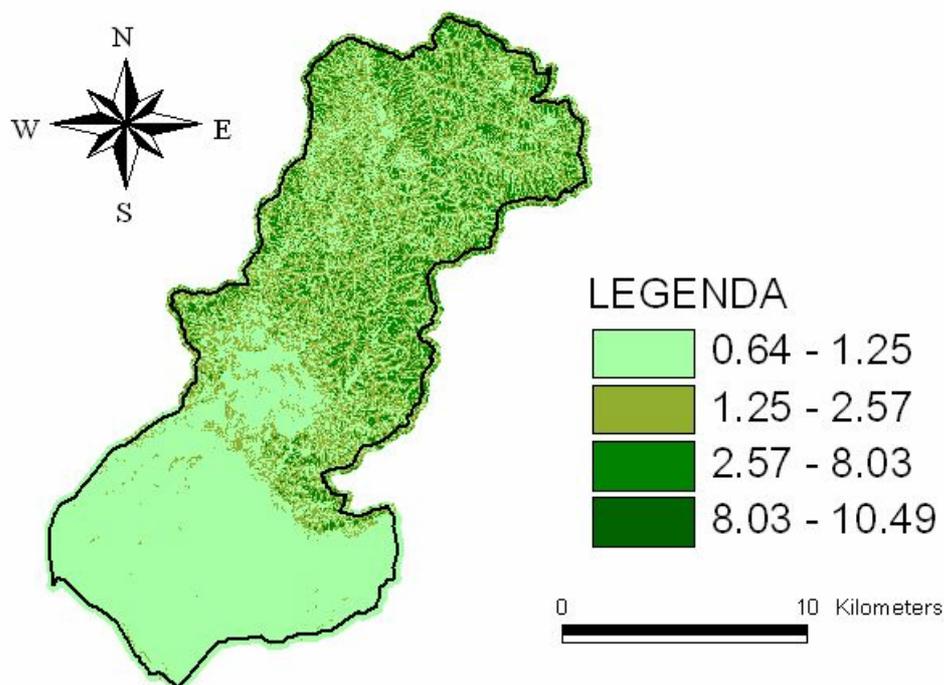


Fig. 4.12/a – Stima del fattore L (lunghezza dei versanti) per il bacino del Tusciano.

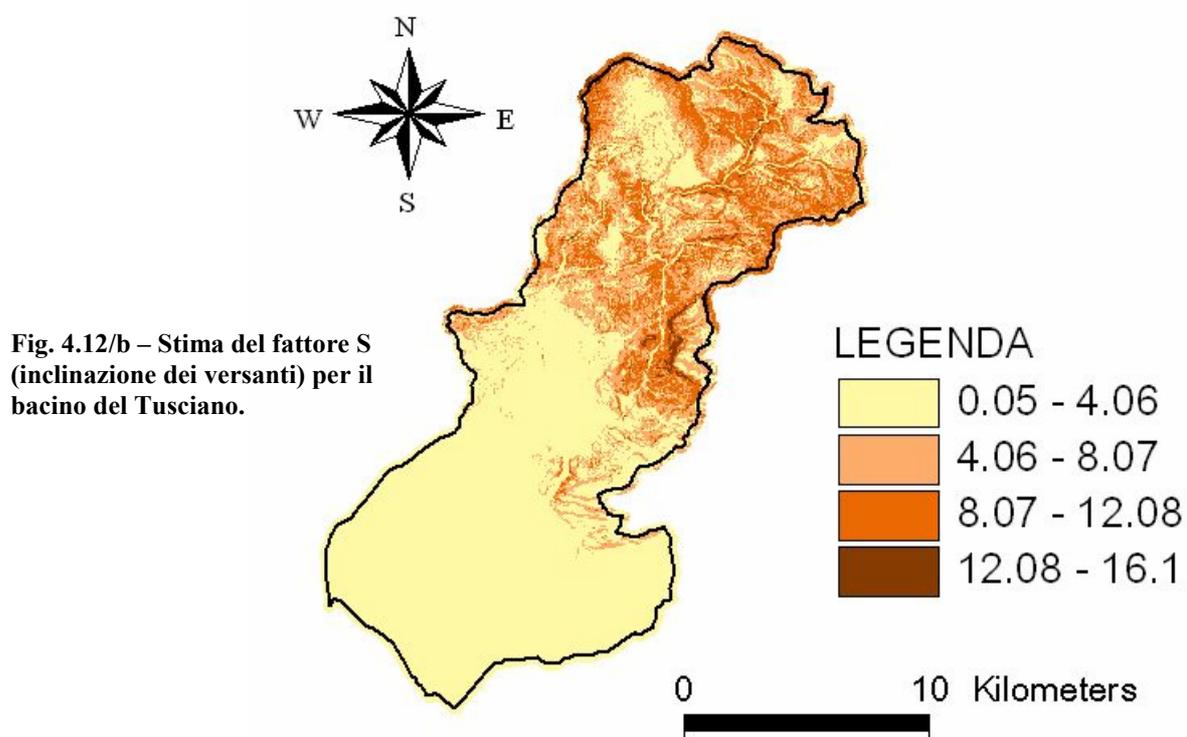


Fig. 4.12/b – Stima del fattore S (inclinazione dei versanti) per il bacino del Tusciano.

In realtà, si raggiungono pendenze elevate ($S > 10$) solo in aree limitate della parte montana e pedemontana mentre nel resto del bacino il fattore S assume valori molto bassi.

A partire dai valori di L e di S ottenuti, è stato valutato il valore del fattore LS per l'intera area, ottenendo il risultato riportato in fig. 4.13.

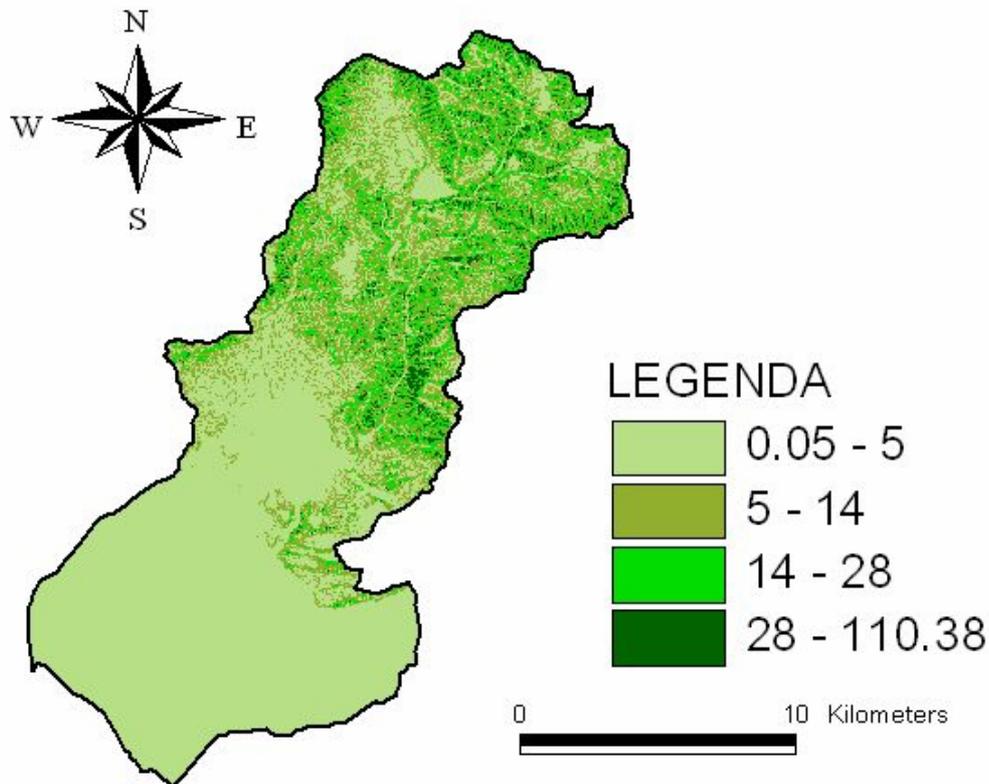


Fig. 4.13: Stima del fattore topografico, LS per il bacino del fiume Tusciano

Il range dei valori è molto ampio (da 0,05 a 110,38) pertanto il valore medio è pari a 6,26 ma presenta una deviazione standard relativamente alta (8,79). Tuttavia, siccome con i sistemi informativi geografici si lavorerà a livello di cella, e ad ogni cella è attribuito il relativo valore del fattore LS, la stima del valore medio per l'intero bacino è puramente indicativa.

Il valore del fattore LS, ottenuta per il bacino del Tusciano, varia in un intervallo che è consistente con i valori descritti da *Renard et al. (1997)*.

Par. 4.5. - Il fattore di copertura vegetale e pratiche di gestione, C

Il fattore di copertura vegetale e pratiche di gestione, indicato con la lettera C nella RUSLE, rappresenta, nel complesso, gli effetti della vegetazione e delle pratiche di gestione agricola sulla velocità di erosione del suolo. Esso è dato dal rapporto tra il valore dell'erosione di un campo coltivato con una data coltura e quello desumibile da un campo condotto a maggese (*Renard et al., 1997*).

Il calcolo di tale fattore può essere effettuato, come citato in *Renard et al. 1997*, utilizzando la formula:

$$SLR = PLU * CC * SC * SR * SM \quad [5]$$

in cui:

SLR = Soil Loss Ratio, rapporto di perdita di suolo in date condizioni;

PLU = Prior Land Use Subfactor, fattore che tiene conto dell'uso prevalente del suolo;

CC = Canopy Cover Subfactor, fattore che tiene conto della copertura uniforme del suolo esercitata dalla vegetazione;

SC = Surface Cover subfactor, fattore che tiene conto della copertura superficiale del suolo;

SR = Surface Roughness subfactor, fattore che tiene conto della rugosità superficiale del suolo;

SM = Soil Moisture subfactor, fattore che tiene conto dell'umidità relativa del suolo.

I fattori contenuti nella formula [5], per loro natura non sono facilmente calcolabili, di conseguenza la valutazione del fattore C con tale formula non sempre risulta applicabile per la variabilità del tipo di colture, delle successioni colturali, delle lavorazioni e delle tecniche colturali, della quantità e delle modalità con cui vengono gestiti i residui delle colture (interrati con la lavorazione, lasciati sulla superficie del terreno o asportati dal campo).

La funzione antierosiva della copertura vegetale si esplica con una intensità diversa in relazione allo stadio di sviluppo della coltura e del periodo del ciclo vegetativo in cui si verificano le piogge erosive. Su questo presupposto si fonda il procedimento per il calcolo del fattore colturale C, proposto da Wischmeier (*Wischmeier e Smith, 1978*). Per tenere conto della interazione coltura-clima, l'autore distingue il periodo di sviluppo della coltura in cinque intervalli di tempo, tra loro consecutivi, divisi nel modo seguente:

Fase 1: Periodo che va dalla lavorazione alla semina (maggese);

Fase 2: Periodo che va dalla semina ad un mese dopo questa;

Fase 3: Periodo che va dal termine della fase precedente al secondo mese dopo la semina;

Fase 4: Periodo che va dal termine della fase precedente alla raccolta;

Fase 5: Periodo dalla raccolta alla nuova semina.

Per ciascuna fase l'autore fornisce i valori del rapporto di perdita di suolo, cioè del rapporto tra la perdita di suolo della coltura in esame e quella di riferimento (maggese nudo). In particolare, i valori di questo rapporto - e quindi dei coefficienti C_i relativi alle colture - possono essere calcolati con la procedura suggerita dallo stesso autore oppure dedotti da una tabella, molto dettagliata, che richiede la conoscenza del tipo di coltura, della rotazione prevista e di alcune indicazioni riguardanti la lavorazione del terreno e la produttività delle colture.

Questa procedura diventa, però, inapplicabile quando sul suolo insistono colture di tipo arboreo, per le quali non sussiste una rotazione colturale.

Nella tabella 4.4 sono state riportate alcune colture in relazione all'uso del suolo, ordinate in modo decrescente in relazione alla funzione di protezione del suolo. Dalla tabella risulta evidente che la funzione protettiva di specie appartenenti alla foresta è molto più grande di quella esercitata dagli alberi da frutto e, in modo simile, le specie erbacee da pascolo assicurano una protezione del suolo più elevata rispetto alle specie erbacee arabili.

Nel caso dei boschi, l'azione protettiva esercitata è dovuta a fattori come l'altezza del fusto, la densità ed il tempo di mantenimento dell'apparato fogliare (caduco, sempreverde), la percentuale di area coperta sul suolo e gli effetti residui dell'uso del suolo, quali la presenza di foglie o di un sottobosco (*Molino & Savastano, 2005*).

La capacità di intercettazione dell'acqua piovana da parte della vegetazione varia dal 30 al 50% e dipende in particolare dalla morfologia della corona, dalla spaziatura e dalla densità di foglie. Essa può essere valutata pari circa al 150% del peso secco delle foglie. L'intercettazione è maggiore nelle specie sempreverdi rispetto ad altre specie, ed i valori medi relativi sono i seguenti:

- Caduco a foglie larghe: 17%;

- Abeti: 40%;

- Pini e sempreverdi a foglie larghe: 30-31%.

(*Commissione Europea*)

Groups of land use	Crops
Permanent vegetation	Lands protected by woods Prairie Permanent pasture Grass-covered orchard Permanent grassland
Grasslands constituted by leguminous plants and graminaceous plants	Alfalfa and brome-grass Clover and Phleum pratense Meadow fescue and clover
Monophytous grasslands with legume for forage	White clover Alfalfa Red clover Yellow sweet-clover Crimson clover
Cereals	Rye Wheat Barley Oats
Legume seedling crops	Soybean Peanut Pea
Row crops	Cotton Potato Tobacco Soybean Corn
Soil with no crops at the moment	Summer fallow Period in which the soil, which is bare after the ploughing, is not yet covered with the crops already planted or which are going to be planted

Decreasing effectiveness
↓

Tab. 4.4: Efficacia relativa della copertura vegetale nella protezione del suolo dall'erosione (in ordine di efficacia decrescente – Fonte: Kohnke e Bertrand, 1959)

La fig. 4.14 illustra come la morfologia della corona influisce sulla capacità di intercettazione dell'acqua piovana.

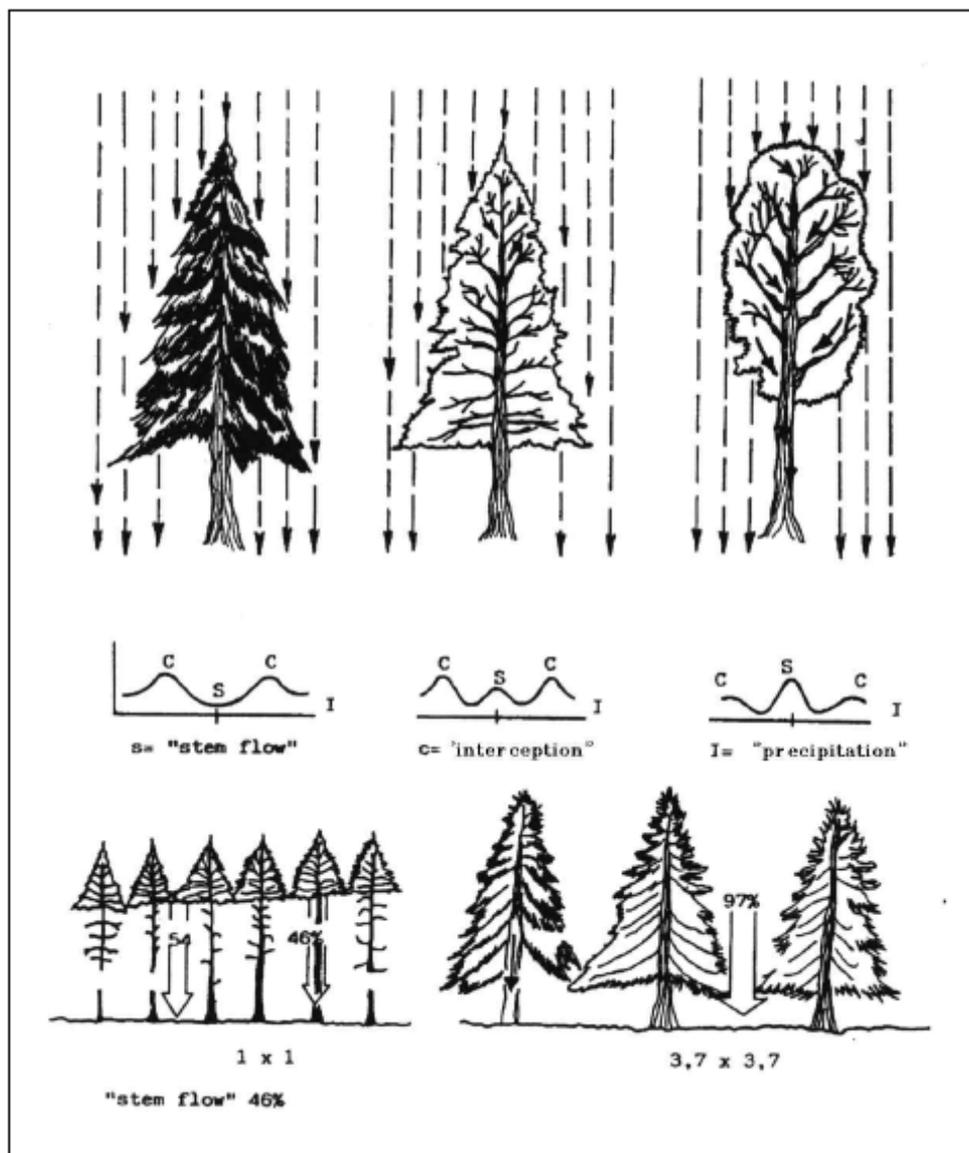


Fig. 4.14: Effetti della morfologia della corona e della spaziatura delle piante sull'intercettazione della pioggia e sul "flusso di stelo" (stem flow)
 Fonte: Kimmings, 1987, citato in documento Commissione Europea

La presenza sul suolo di uno strato di foglie, incrementando la rugosità superficiale, provoca una significativa riduzione del runoff superficiale e di conseguenza dell'erosione.

In tab. 4.5 è riportata la variazione percentuale di runoff superficiale in relazione alla copertura del suolo.

Tab. 4.5: Percentuale di runoff in funzione del tipo di copertura del suolo.

Tipo di copertura del suolo	Runoff (%)
Bosco efficiente	0 - 10
Bosco inefficiente	20 - 50
Pascolo naturale	30 - 95
Incolto o terre abbandonate	50 - 100

Da quanto detto, quindi, è evidente che il valore da attribuire al fattore C è influenzato sia dall'uso del suolo (bosco, pascolo, prato ecc.), sia dalla densità del popolamento vegetale. Valori di C uguali o 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 arborea.

Tuttavia, il fattore C descritto da **Wischmeier & Smith (1978)** non tiene in considerazione l'eventuale presenza di rocce affioranti, molto comuni in aree non agricole, né l'effetto protettivo esercitato dalla frazione di scheletro che non subisce l'azione disgregante della pioggia, per cui si può avere una sovrastima dell'erosione. Al contrario, valori prossimi all'unità vengono assegnati a colture scarsamente protettive per copertura vegetale o perché subiscono lavorazioni agricole meccaniche che possono favorire il fenomeno erosivo. Il valore zero viene, inoltre, assegnato alle aree "impermeabili" del tessuto urbano e alla rocce affioranti.

(Regione Emilia Romagna)

Rispettando questo principio, si ritrovano in letteratura numerosi casi di valutazione del fattore C per le principali classi di coperture del suolo esistenti. (**Detar W.R. et al., 1980; Dissmeyer & Foster, 1981; Chisci G. & Zanchi C., 1994; Boellstorff & Benito, 2005, Francese et al., 2005**).

In ogni caso il punto di partenza per la stima di C è l'individuazione delle classi di uso/copertura del territorio.

Per i territori del bacino del fiume Tusciano, considerando la carta dell'utilizzazione agricola del suolo (*CUAS, Regione Campania, scala 1:50000*), sono state individuate e definite 28 tipologie di uso/copertura del suolo, riportate nella tabella 4.6, unitamente al valore attribuito al parametro C (inteso come valore medio annuo).

Per attribuire i suddetti valori al fattore di copertura vegetale (C) si è fatto riferimento, per ciascuna tipologia di copertura vegetale, a quanto riportato nel manuale applicativo della *RUSLE (Renard et al., 1994)* e dell'*USLE (Wischmeyer e Smith, 1978)*.

Considerando però, che non sempre le coperture tipiche dei nostri ambienti e la vegetazione presente sul bacino trovano un esatto corrispondente nelle tabulazioni proposte, si è proceduto anche ad alcune modifiche del coefficiente C, così come proposto da **Molino & Savastano (2005)**.

Tab. 4.6 – Stima del fattore di copertura vegetale in funzione dell'uso del suolo.

Uso del suolo	Valore fattore C (RUSLE)	Uso del suolo	Valore fattore C (RUSLE)
Acque	0	Colture industriali	0,410
Tessuto urbano	0	Prati avvicendati	0,410
Rocce e/o affioramenti	0	Prati permanenti adibiti al pascolo	0,006
Frutteti	0,410	Boschi di latifoglie	0,042
Oliveti	0,410	Castagneti	0,042
Vigneti	0,410	Boschi di conifere	0,130
Agrumeti	0,410	Ortive	0,410
Pascoli inutilizzati	0,400	Orticole / frutticole	0,410
Pascolo al naturale	0,400	Erbai	0,410
Cespugli e/o arbusti	0,400	Sistemi colturali complessi	0,410
Vegetazione sclerofilla (macchie e garighe)	0,360	Colture temporanee e/o permanenti	0,410
Colture foraggere	0,410	Aree con vegetazione rada	0,700
Cereali da granella	0,410	Aree degradate da incendi	0,700
<i>Cereali da granella c.f.</i>	0,410	Spiagge	1

Tra le classi presenti in tabella è stato attribuito valore **0** a:

- **acque;**
- **tessuto urbano;**
- **rocce in affioramento e/o aree denudate**

Come previsto da Wischmeier & Smith, agli alberi privi di sottobosco, con altezza media di 4 m ed un'area coperta al suolo del 25%, è stato attribuito un valore pari a **0,410**. Considerando le classi di uso del suolo riportate nella tabella 4.7, possono rientrare in questa classe quelle che vengono generalmente definite “*colture arboree*”, e cioè: i **frutteti**, gli **oliveti**, i **vigneti** e gli **agrumeti**.

Alla categoria “**incolto**” appartengono quelle aree caratterizzate da una copertura di vegetazione erbacea spontanea. A tale classe è stato attribuito un valore del fattore C pari a **0,400**.

Delle classi di uso del suolo presenti in tabella appartengono a tale categoria i **pascoli inutilizzati**, i **pascoli al naturale** e **cespugli e/o arbusti**.

Alla *vegetazione sclerofilla*, comprendente macchie e garighe, considerato che la copertura dell'apparato aereo delle piante e la copertura al suolo sono assimilabili a quella prevista per "erba alta o sottobosco con altezza media di caduta delle gocce di 0.5 m", è stato assegnato il valore **0,360**.

L'attribuzione del valore di *C* alla classe "seminativi" (cui possono essere assimilati in modo generico i *cereali*, le *colture foraggere*, le *colture industriali* e i *prati avvicendati*) è stata eseguita utilizzando la procedura originale di Wischmeyer, in base alla quale, per l'analogia esistente con la rotazione biennale mais - frumento sia per le fasi di sviluppo della vegetazione che per le lavorazioni richieste, è stato assunto un valore pari a **0,41**.

Ai *prati permanenti adibiti al pascolo* è stata fatta corrispondere la classe di uso "grass and legume mix" (miscela di graminacee e leguminose) a cui corrisponde un valore di **0,006**.

Per l'attribuzione del valore di *C* alle classi *boschi di conifere*, *boschi di latifoglie* e *castagneti*, bisogna tenere conto del diverso grado di copertura esercitato dalle piante, del tipo di apparato aereo della pianta, nonché delle specifiche valutazioni reperite in letteratura. (*Molino e Savastano, 2005*). Per tale motivo è stato attribuito un valore di **0,042** ai boschi di latifoglie e castagneti e di **0,130** ai boschi di conifere.

Per le rimanenti classi presenti in tabella 4.7, evidenziate dal fondo giallo, si è reso necessario un accorpamento alle classi di uso del suolo già individuate o l'attribuzione dei valori di *C* soggettivi, che tenessero comunque conto dell'uso del suolo e dell'impatto sul territorio esercitato da quel tipo di coltura.

Per tale motivo:

* alle *spiagge* è stato attribuito un valore di *C* pari a **1**, considerando l'area priva di vegetazione e, pertanto, totalmente esposta al fenomeno erosivo;

* alle *aree degradate da incendi*, considerando che non sono del tutto prive di vegetazione ma possono ancora contenere dei residui di radici o comunque essere in fase di rimboschimento, è stato attribuito un valore pari a **0,700**. Tale valore è uguale a quello delle aree con vegetazione rada cui queste aree possono essere paragonate;

* le *colture ortive*, quelle *orticole/frutticole* e le *colture temporanee e/o permanenti* sono state assimilate tutte ai seminativi irrigui e, pertanto, ad esse è stato attribuito un punteggio pari a **0,410**;

* gli *erbai* sono colture foraggere di durata annuale caratterizzati da uno sviluppo molto rapido. Sono, pertanto, assimilabili ai prati avvicendati e pertanto ad essi è attribuibile un valore di C pari a **0,410**;

* i *sistemi colturali complessi* sono aree la cui copertura è rappresentata da colture varie per le quali è possibile fornire solo un valore orientativo medio che tenga conto della loro eterogeneità. Tenendo conto della dislocazione di tali aree all'interno del bacino, cioè nelle immediate vicinanze dei centri urbani, si può considerare che si tratti prevalentemente di colture ortive, frutteti e colture arboree in genere pertanto è stato ad esse attribuito un valore medio pari a **0,410**;

* le *aree con vegetazione rada* sono quelle più esposte al fenomeno erosivo, in quanto coperte solo parzialmente da vegetazione. Anche in questo caso, trattandosi di aree per le quali non è possibile stabilire la percentuale di superficie coperta da vegetazione e quella che è invece esposta al fenomeno erosivo, si è attribuito ad esse arbitrariamente un valore di C pari a **0,700**. Tale valore tiene conto del fatto che queste zone produrranno un'erosione ancora più intensa se gli eventi piovosi si verificano durante le fasi vegetative in cui la coltura offre un grado di copertura del suolo più basso.

L'attribuzione territoriale del fattore C è stata effettuata con i sistemi GIS, il cui risultato è riportato nella fig. 4.15.

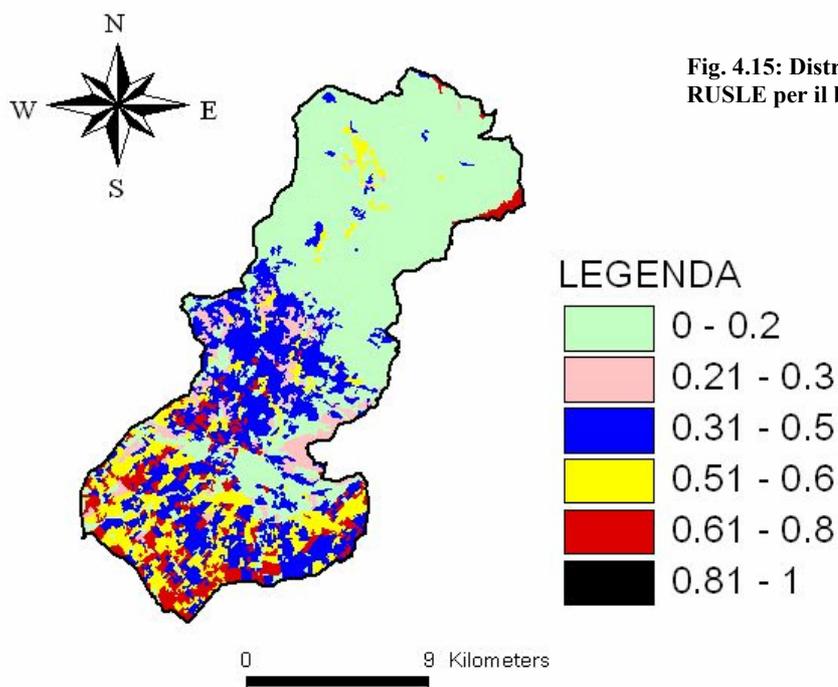


Fig. 4.15: Distribuzione del fattore C della RUSLE per il bacino del fiume Tusciano

Il valore medio del fattore C è risultato pari a 0,22. Tale valore tiene in conto il fatto che la parte montana del territorio del bacino (circa il 50%) è coperta da boschi, a cui è stato attribuito un valore di C relativamente basso.

Un'ulteriore stima del parametro C per il bacino del Tusciano è stata fatta sfruttando i cosiddetti **“indici vegetazionali”** ricavabili dalle immagini da satellite. Tali indici rappresentano delle efficaci fonti di informazione per il monitoraggio della copertura vegetale. La loro determinazione è basata su combinazioni di misure di riflettanza in due o più canali spettrali e sono altamente correlati con parametri associati allo stato di salute delle piante ed a variabili della copertura vegetale come l'indice di area fogliare (*LAI, Leaf Area Index*), la frazione di copertura vegetale e la biomassa verde.

Gran parte di questi indici sono basati su combinazioni algebriche della riflettanza nell'intervallo spettrale del rosso ($\lambda, 0,63 - 0,69 \mu\text{m}$) e del vicino infrarosso ($\lambda, 0,76 - 0,90 \mu\text{m}$) in quanto la vegetazione ha un'interazione molto caratteristica con queste due bande spettrali (*Ceriali, 2002*).

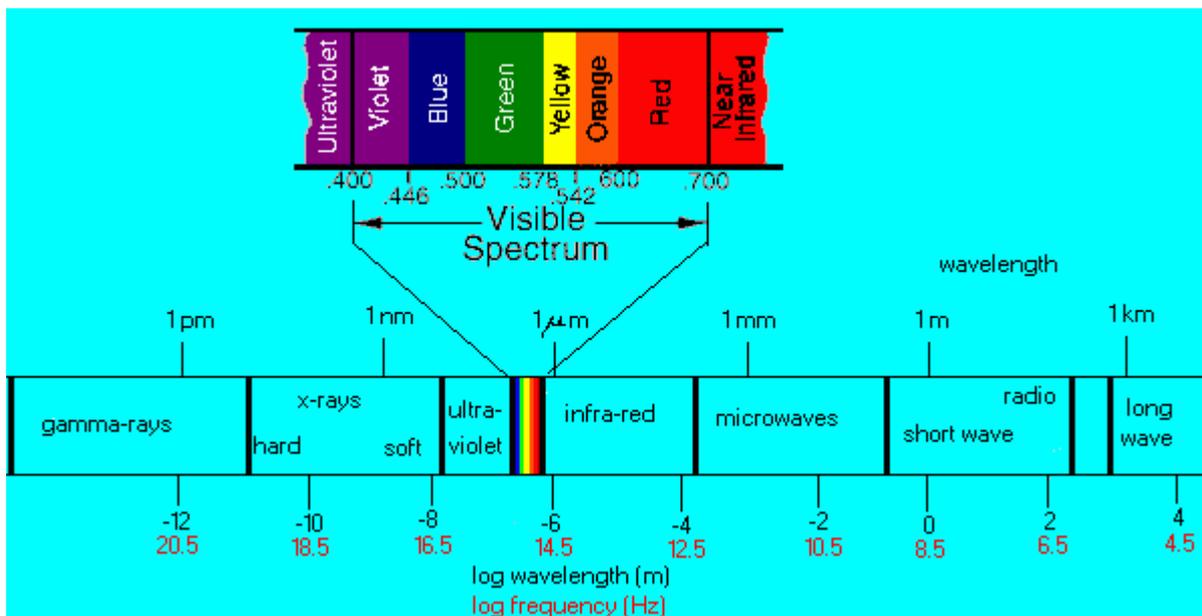


Fig. 4.16 – Spettro elettromagnetico. Fonte: <http://astroemagazine.astrofili.org/num23/universo/universo.htm>

I pigmenti presenti nelle foglie delle piante, in particolare la clorofilla a, assorbono fortemente la luce visibile nell'intervallo da 0,4 a 0,7 μm per utilizzarla nel processo di fotosintesi; la struttura della foglia invece, riflette fortemente la luce del vicino infrarosso (da 0,7 a 1,1 μm) (*NASA, USA*).

Il contrasto rosso/vicino infrarosso permette dunque di distinguere nettamente la vegetazione da altri elementi presenti nelle immagini come suolo, acqua, edifici (vedi fig. 4.17) ed è alla base di molti indici quantitativi che vengono utilizzati per misurare la condizione di vegetazione da dati telerilevati.

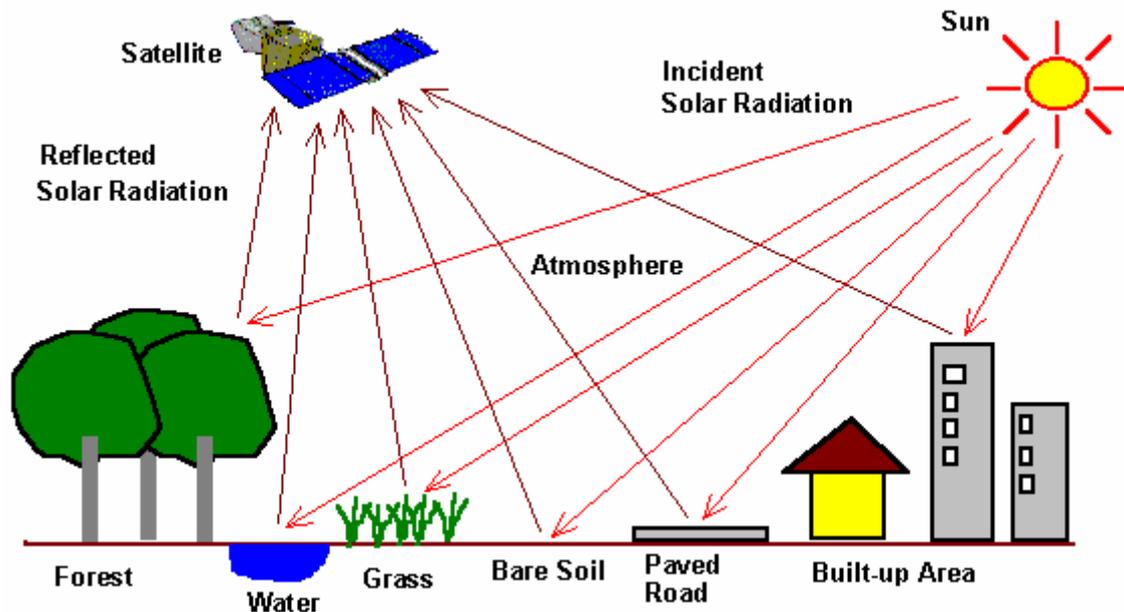


Fig. 4.17: Riflettanza della radiazione elettromagnetica rilevata dal satellite.

Fonte: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/optical.htm>

L'indice vegetazionale più diffuso, sfruttato anche per il calcolo del fattore C della RUSLE del bacino del fiume Tusciano, è l'indice di vegetazione normalizzato (**NDVI, Normalized Difference Vegetation Index**) che ha il vantaggio di permettere il confronto di immagini riprese in tempi diversi.

La formula che permette di ricavare l'NDVI dalle immagini satellitari è:

$$NDVI = \frac{(B_4 - B_3)}{(B_4 + B_3)}$$

in cui: B_4 = riflettanza nel vicino infrarosso (NIR, Near InfraRed); B_3 = riflettanza nel rosso (R, Red) (*Ceriali, 2002*).

In base a quanto detto finora, appare evidente che una vegetazione più rigogliosa assorbirà più radiazione visibile e rifletterà una maggiore quantità di radiazione nel vicino infrarosso. Al contrario si verificherà nel caso di vegetazione sparsa. L'effetto di questo diverso

comportamento, si manifesterà con un diverso valore dell'indice NDVI, come riportato in fig. 4.18.

L'indice NDVI calcolato per una data cella assumerà un valore variabile nell'intervallo da -1 a +1 e, laddove non ci sono foglie, il valore attribuito sarà prossimo allo zero. Laddove l'NDVI assume valori prossimi a +1, significherà che in quel luogo è presente la massima concentrazione di vegetazione possibile (*NASA, USA*).

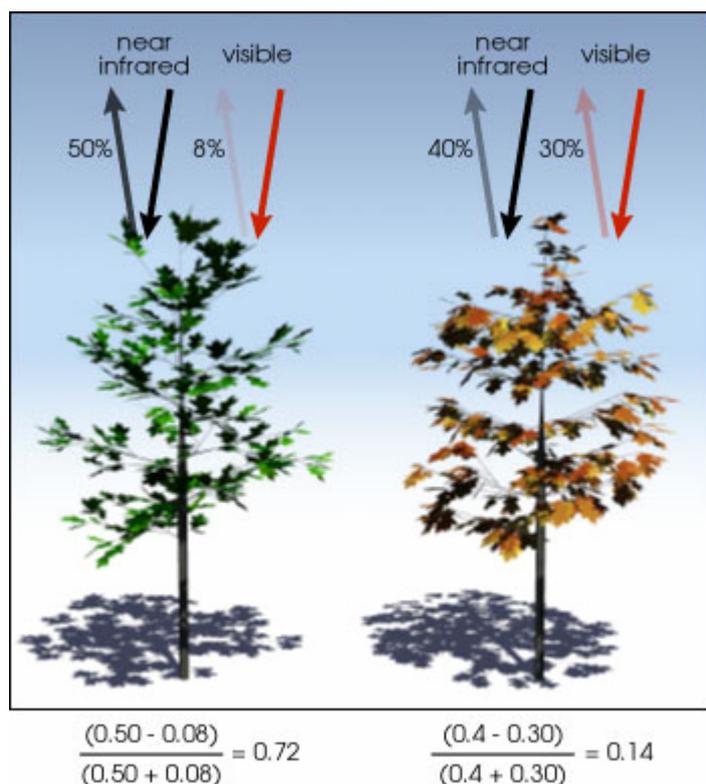


Fig. 4.18: Riflettanza della radiazione nelle lunghezze d'onda del rosso e del vicino infrarosso da parte di tipi di vegetazione diversi.

Il valore di NDVI calcolato è sensibilmente diverso per i due tipi di vegetazione.

Fonte: NASA, USA

Nel caso specifico del bacino del fiume Tusciano, le immagini satellitari multispettrali utilizzate per il calcolo dell'NDVI sono state fornite dall'Unità di Supporto Locale n. 6, Progetto Operativo Difesa Suolo (PODiS) – Reg. Ob. 1 (PON ATAS 2000-2006) – Direzione Generale Difesa del Suolo – Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e sono riferite all'anno 2001. In particolare, l'immagine “invernale” è tratta dal satellite Landsat 7 (fig. 4.19/A) ed è del giorno 25 novembre 2001 mentre l'immagine “estiva” è tratta dal satellite Landsat 5 ed è del giorno 26 giugno 2001 (fig. 4.19/B). Entrambi le immagini hanno una risoluzione al suolo di 30 m.



Fig. 4.19/A – Immagine Landsat7 del 25/11/01

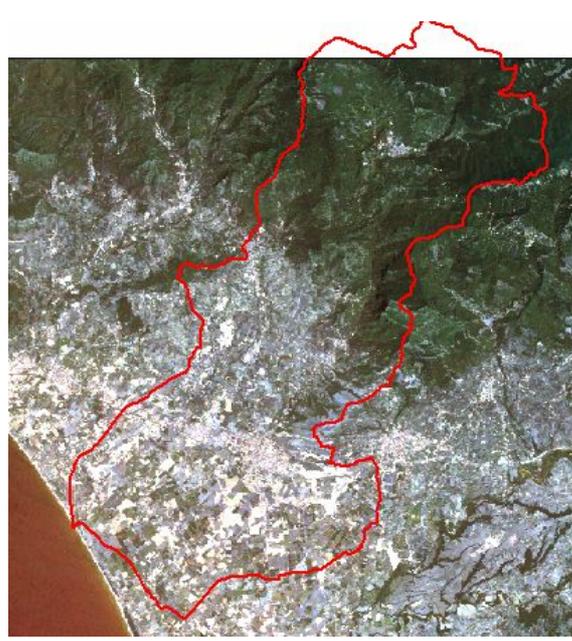


Fig. 4.19/B – Immagine Landsat5 del 26/06/01

Come è evidente, le immagini a disposizione non coprono totalmente la zona di interesse, ma lasciano una zona scoperta a nord del bacino. Per tale zona, il valore del fattore C è stato poi ricavato per estrapolazione.

Una volta estratte le bande del rosso e del vicino infrarosso e calcolato l'indice NDVI per l'intera area, è stata effettuata la “normalizzazione” dell'indice in accordo a quanto riportato da *Van Leeuwen & Sammons (2003)*. Secondo gli autori, considerando il fatto che le aree con valori di NDVI minori di zero raramente contengono vegetazione (es. acqua, neve, ecc.) e che le aree su cui è presente vegetazione assumono valori considerevolmente al di sopra di 0,1, è stato settato come valore limite inferiore un NDVI pari a 0,05.

Nella fig. 4.20 è riportato l'indice vegetazionale non normalizzato calcolato per il bacino del Tusciano, mentre la fig. 4.21 riporta l'NDVI settato al valore minimo di 0,05.

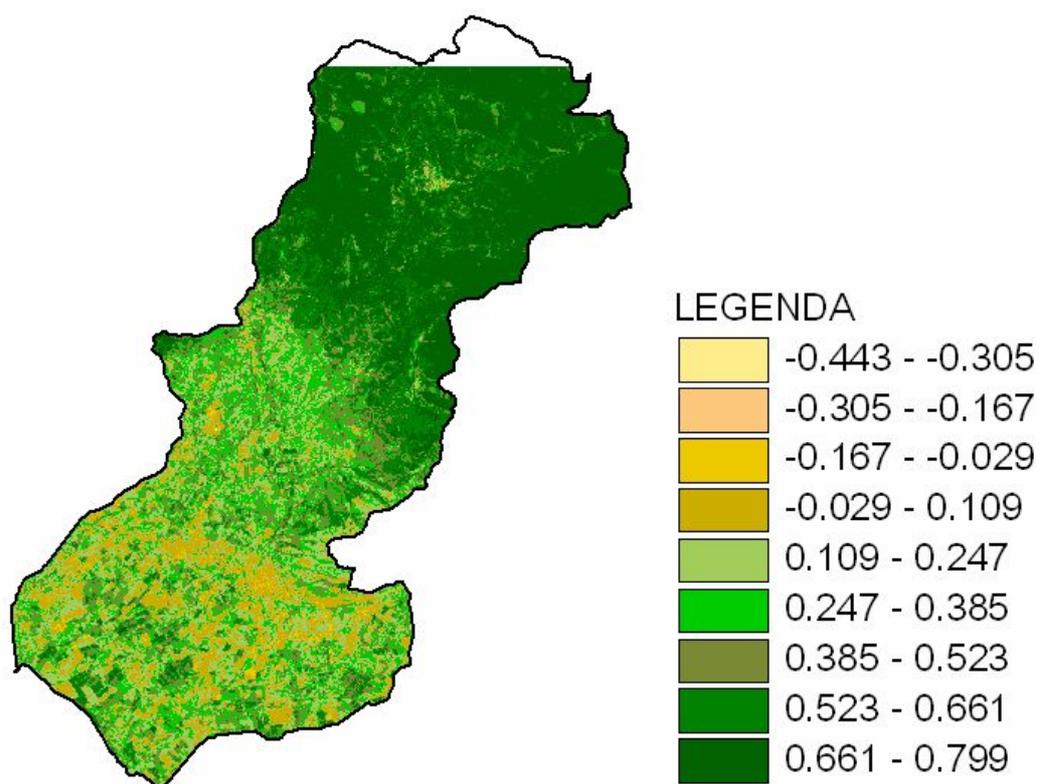


Fig. 4.20: Indice vegetazionale non normalizzato. L'intervallo di variabilità è da -0,443 a 0,799

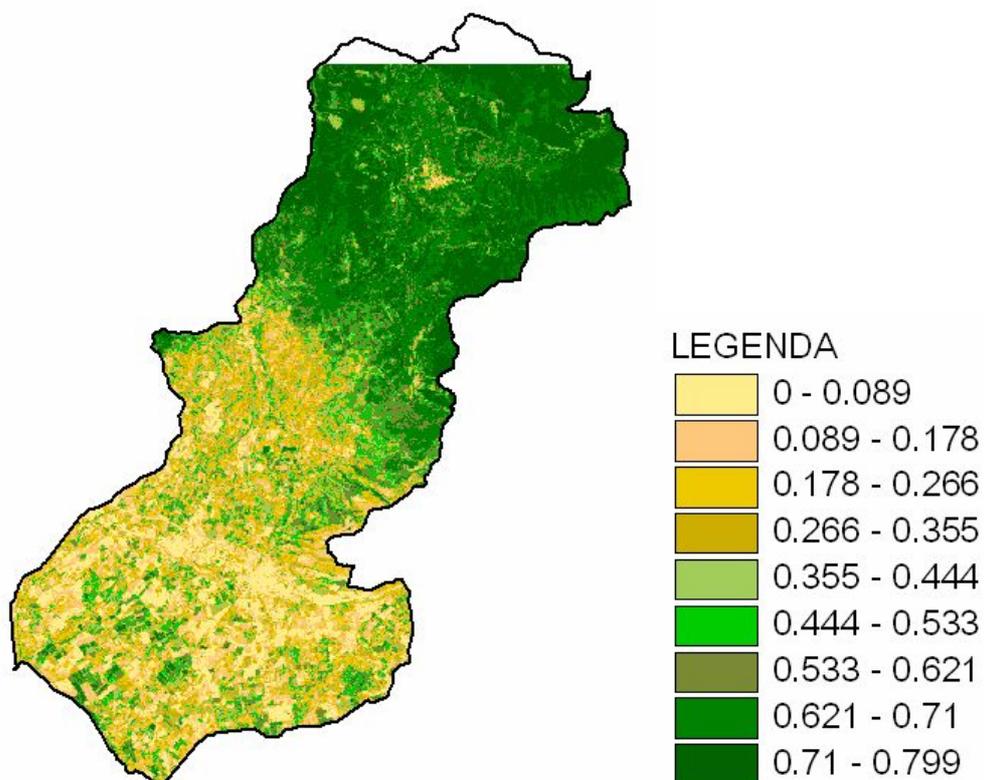


Fig. 4.21: Indice vegetazionale normalizzato (NDVI). L'intervallo di variabilità è da 0 a 0,799

Una volta ricavato il valore dell'indice NDVI per l'intera area è stato calcolato il valore di C in base alla relazione proposta da Van der Kniff et al. (1999) nella valutazione del rischio erosione in Italia.

In tale lavoro il fattore C è correlato all'indice NDVI mediante la relazione:

$$C = \exp^{-2\left(\frac{NDVI}{1-NDVI}\right)}$$

Tale relazione di tipo esponenziale è stata ricavata sperimentalmente; infatti la relazione lineare proposta da De Jong (1994), non era adatta per prevedere valori di C superiori a 0,431.

Per l'area oggetto di studio, la valutazione di C ottenuta per il periodo estivo ed il periodo invernale è riportata rispettivamente nella fig. 4.22/a e nella fig. 4.22/b.

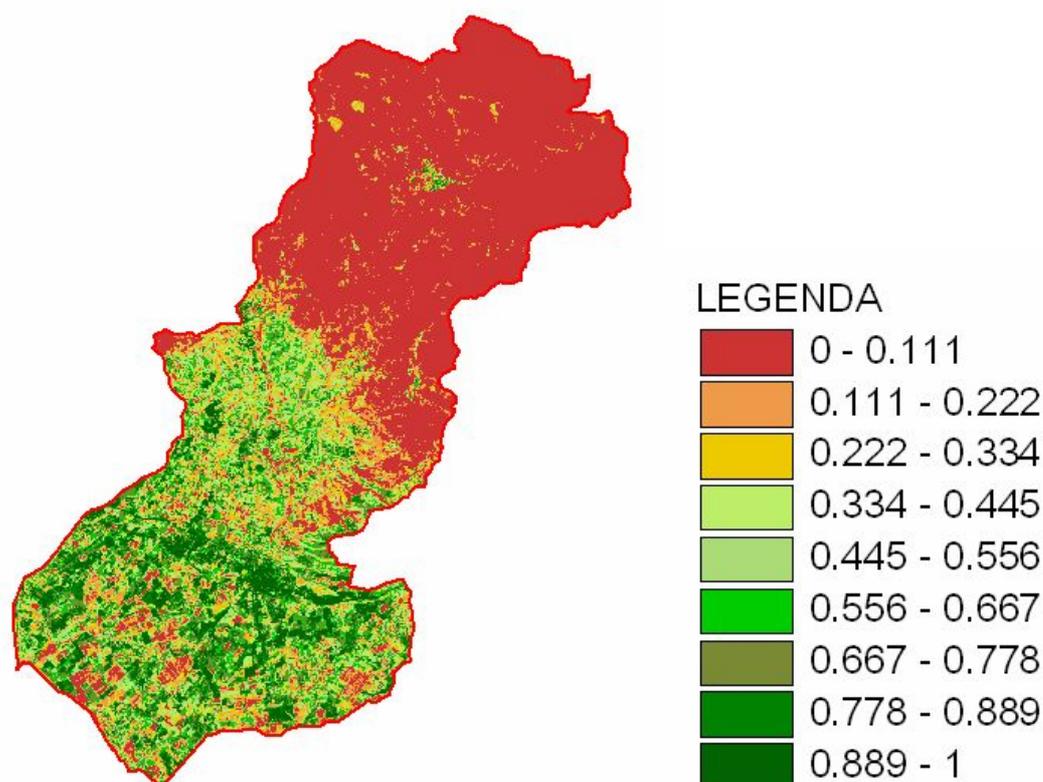


Fig. 4.22/a – Stima del fattore C riferita al periodo estivo. (Immagine da Landsat 5 del 26/06/01)

Per la parte nord del bacino, che non era compresa nelle immagini da satellite, la stima di C è stata estrapolata considerando l'uso del suolo prevalente nella zona. Infatti, dalla carta dell'uso agricolo del suolo, è emerso che la classe principale di uso del suolo è "boschi di latifoglie" pertanto è stato ricavato il valore di C attribuito a quella classe ed applicato all'area per la quale

non erano a disposizione dati. Lo stesso è stato fatto anche per la stima del fattore C relativa al periodo invernale.

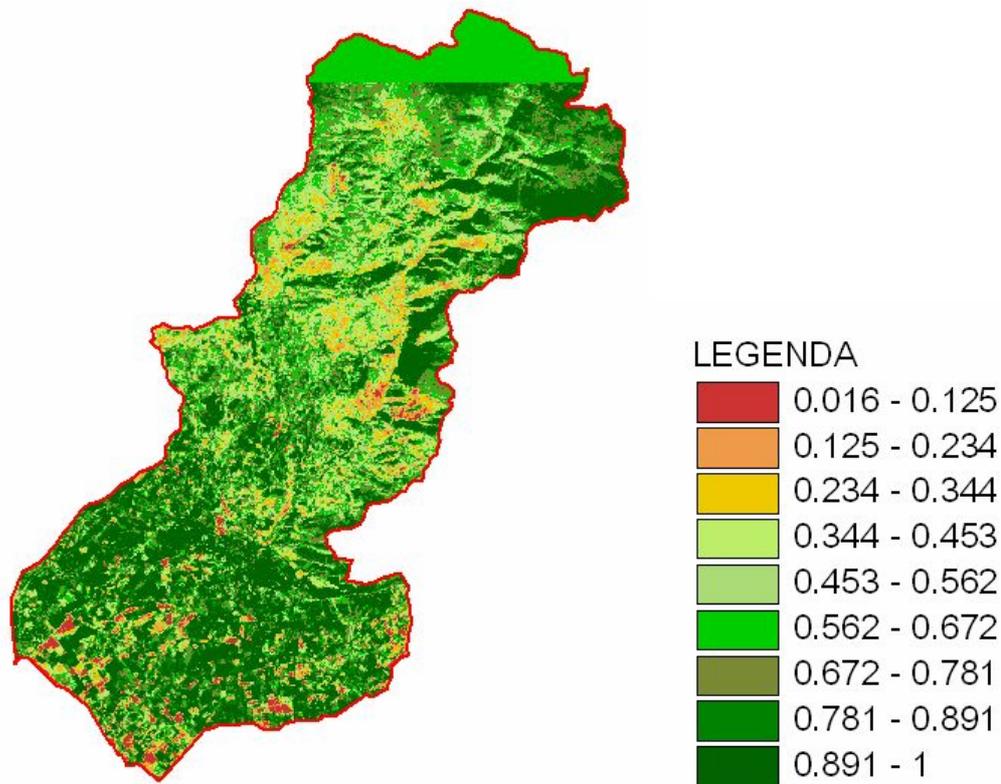


Fig. 4.22/b – Stima del fattore C riferita al periodo invernale. (Immagine da Landsat 7 del 25/11/01)

La stima di C ottenuta con tale relazione, comporta le seguenti considerazioni:

- per la maggior parte dell'anno il valore di C stimato per il pascolo sembra piuttosto alto se confrontato ai valori pubblicati in letteratura;
- il valore di C previsto per i boschi è vicino allo zero per la maggior parte dell'estate e ciò sembra alquanto realistico;
- i valori di C per il periodo invernale **sembrano alquanto elevati e dunque non realistici**. La spiegazione più probabile è che l'indice NDVI è sensibile solamente a vegetazione sana e fotosinteticamente attiva. Le foreste hanno generalmente uno spesso strato di paccame che ricopre il suolo assicurando un'eccellente protezione contro l'erosione del terreno;
- I valori di C previsti per la categoria "terre arabili" sono più difficili da giudicare in quanto i valori reali dipendono principalmente dal tipo di pratiche e dalla gestione del raccolto che sono entrambi sconosciuti nel nostro caso. La gamma di valori ottenuti

tuttavia sembra essere ragionevolmente realistica, anche se i valori invernali sembrano eccessivamente bassi.

Da quanto finora detto, seppure in forma schematica, risulta evidente che la scelta oculata delle colture e il modo con cui queste vengono gestite influenza sensibilmente l'entità dell'erosione. Essa rappresenta, in definitiva, uno dei mezzi più efficaci per contrastare il fenomeno erosivo. È proprio il fattore di copertura C che viene spesso utilizzato per paragonare diverse pratiche di gestione e scegliere i piani di conservazione più adatti al territorio.

Par. 4.6. – Le pratiche antierosive, P

Wischmeier e Smith (1978) definirono il fattore delle pratiche conservative o antierosive (P) come il rapporto tra la perdita di suolo da un campo in cui è attuata una specifica pratica antierosiva e la corrispondente perdita di suolo da un campo arato a rittochino e continuamente lavorato. In altri termini, il fattore P della RUSLE esprime l'influenza sulla perdita di suolo delle pratiche antierosive.

Le pratiche di gestione tipicamente influenzano l'erosione agendo su un reindirizzamento del runoff lungo il versante in modo da diminuire l'erosività oppure mediante un "rallentamento" del runoff superficiale che causa la deposizione dei sedimenti trasportati. Ciò può essere realizzato in due modi:

1. modificando la rete di deflusso;
2. modificando la pendenza o la direzione del runoff mediante terrazzamenti, ciglionamenti o altre opere di sistemazione idraulico-agraria (**Lee, 2004; Regione Emilia Romagna, 2004**).

Nell'ambito della meccanizzazione integrale dell'agricoltura, i nuovi impianti sono stati realizzati secondo il criterio di far lavorare le macchine operatrici nel modo più agevole e continuo possibile nonché nelle condizioni di minimo rischio possibile per l'incolumità dell'agricoltore. In quest'ottica si è verificata una "rimodellazione" dei versanti collinari, abbandonando i terrazzamenti e le tradizionali sistemazioni a "girapoggio" a favore di sistemazioni a "rittochino". Le prime, seguendo le curve di livello, conferiscono una componente orizzontale al decorso delle acque meteoriche rallentandone il deflusso, mentre le seconde, caratterizzate dalla disposizione di filari secondo le linee di massima pendenza, rendono agibili ai trattori anche le pendici più ripide ($>20^\circ$) esponendole, con le lavorazioni, ad erosione sicura e dissesto idrogeologico (**Fanizzi e Misceo, 2003**).

Per risanare simili situazioni dunque bisognerebbe far ricorso al ruolo fondamentale della vegetazione erbacea ai fini dell'intercettazione del flusso idrico, delle perdite di suolo e dei suoi elementi di fertilità. Ad esempio, una particolare disposizione delle colture sul terreno, una loro rotazione temporale (rotazione culturale), la ritenzione di residui vegetali (i cosiddetti pacciame), specifici trattamenti di fertilizzazione oppure l'inerbimento permanente dei frutteti o limitato ad un periodo dell'anno (*covercrops*), pone problemi più complessi di gestione agraria, in quanto bisogna rivedere la tecnica culturale in modo da favorire gli aspetti sinergici e penalizzare quelli competitivi tra fascia arborea. Nelle zone a vocazione granaria, invece, il

suolo agrario può permanere ogni anno a nudo da luglio a dicembre (termine ancora utile per la semina), rievocando l'era del maggese e le inquietanti conseguenze sul ciclo idrologico e sul trasporto solido di bacino (*Caporali, 1985*).

Il fattore P è adimensionale e varia tra 0 e 1. Il valore più basso indica la pratica di gestione più idonea a ridurre l'erosione del suolo mentre per i territori su cui non sono in atto pratiche di conservazione del suolo (ad es. foreste e tessuto urbano) si pone $P = 1$ (*Lee, 2004*).

Nella maggior parte dei lavori presenti in letteratura, il fattore P viene posto pari ad 1, indipendentemente dall'uso del suolo e dall'estensione del territorio, in quanto non ci sono informazioni sufficienti sugli interventi messi in atto nelle diverse zone per limitare le perdite di suolo (*Onori et al, 2006; Lee, 2004; Fu et al., 2006; Hoyos, 2005; Millward & Mersey, 1999; Svorin, 2003*).

Anche per il bacino del fiume Tusciano, dopo sopralluoghi sul posto, è stato posto il fattore $P=1$ in quanto non è stata riscontrata l'attuazione di particolari pratiche antierosive.

Par. 4.7. – Stima dell'erosione del bacino del fiume Tusciano

La stima della quantità annua di suolo eroso per il bacino del fiume Tusciano è stata effettuata applicando la RUSLE (*Renard et al., 1997*) la cui formulazione è:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Indicando con:

- A, quantità di suolo eroso in Mg/ha anno;
- R, erosività della pioggia in MJ mm / ha h anno;
- K, erodibilità del suolo in Mg ha h / ha MJ mm
- LS, fattore topografico, adimensionale
- C, Copertura vegetale e pratiche di gestione, adimensionale
- P, pratiche antierosive, adimensionale

Per tutti i fattori utilizzati nella RUSLE sono stati elencati nei paragrafi precedenti i diversi metodi di stima esistenti ed è stato scelto quello ritenuto più opportuno, in base ai dati ed alle conoscenze disponibili.

Per il fattore C, sono stati testati due metodi di stima e cioè:

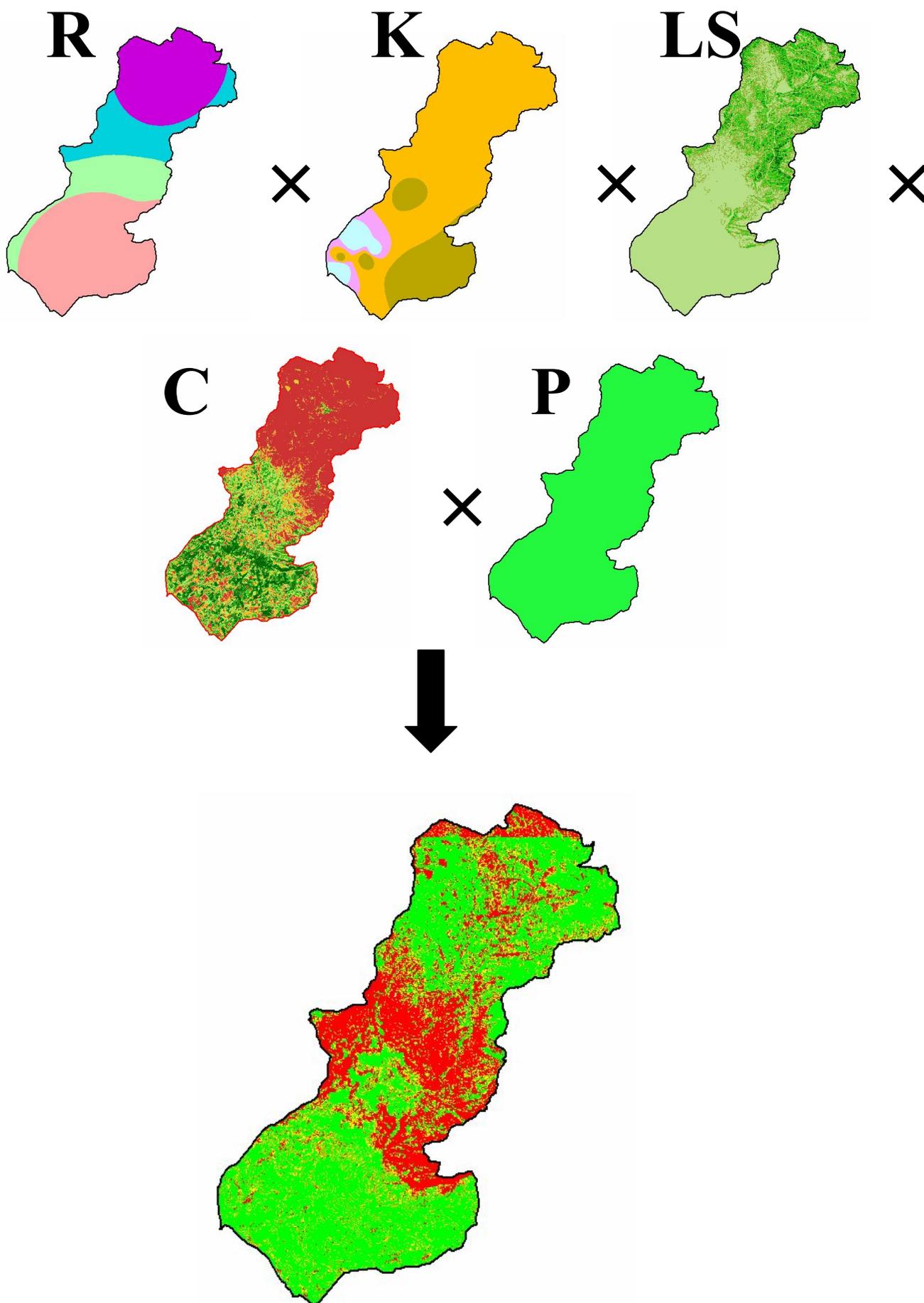
- attribuzione di un punteggio al fattore in base alla carta delle coperture;
- estrapolazione del fattore dalle immagini da satellite estive e invernali.

Tra i due metodi, è stato ritenuto opportuno utilizzare il *layer* relativo alla stima di C dalle immagini estive in quanto più attendibile per i motivi già citati nel par. 4.5.

L'unico fattore per il quale non è stato ritenuto opportuno procedere a differenziazioni lungo il bacino è stato il fattore P, in quanto le pratiche attuate per evitare l'erosione nel bacino non influenzavano in maniera significativa il processo erosivo.

Il calcolo di A dunque è stato effettuato tramite l'uso di Arcview, moltiplicando tra loro gli strati informativi (*layers*) relativi a ciascun fattore.

Nella fig. 4.23 è schematizzato il processo di calcolo della quantità di suolo perso per erosione espresso in t/ha anno.



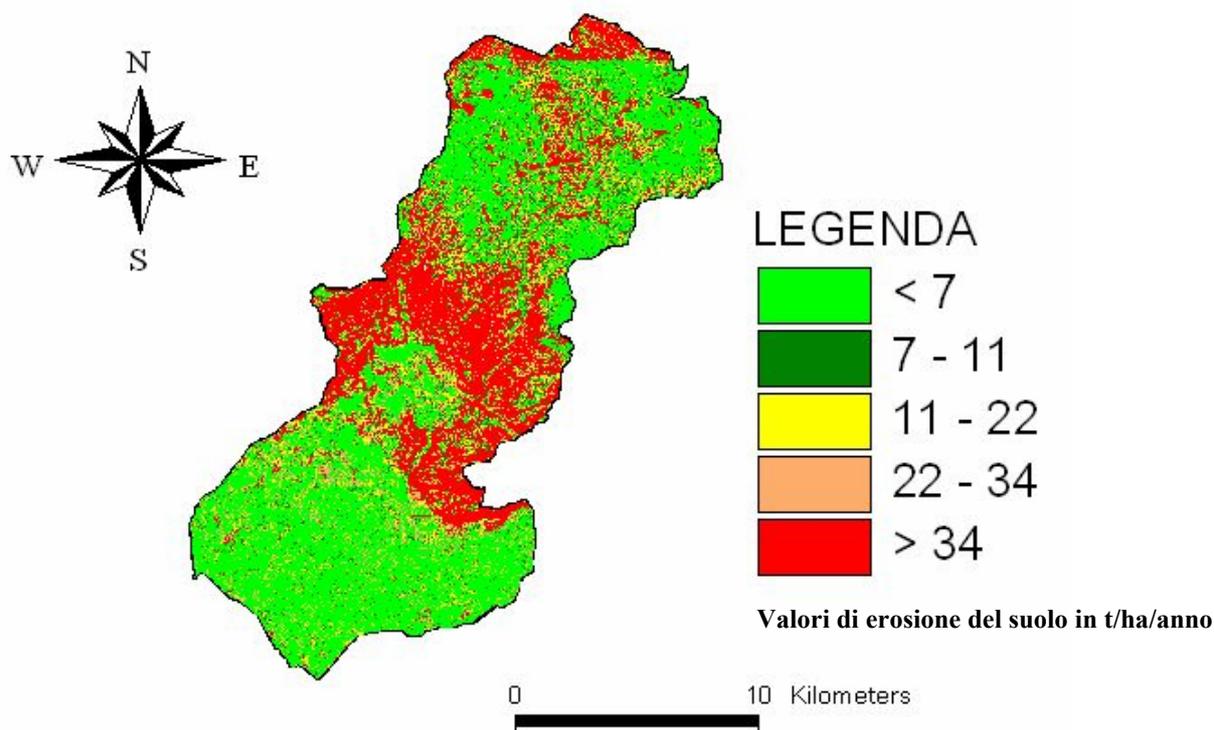


Fig. 4.23 – Processo di calcolo della perdita di suolo effettuato con Arcview.

Il valore medio di erosione del suolo è risultato di **57.00 t/ha anno** di suolo ma la deviazione standard è molto elevata visto l'ampio range di valori in cui varia il parametro A (da 0.004 a 5458.61 t/ha anno).

Considerando l'area totale del bacino, che è pari a 26074.23 ha, è possibile definire la quantità totale di suolo eroso dal bacino che è pari a: **1486231,23 t/anno**.

Il raggruppamento in classi è stato effettuato in accordo a quanto riportato da **Stone & Hilborne (2000)** (cfr tab. 4.7), secondo i quali i gradi di erosione sono i seguenti:

Tab. 4.7 – Suddivisione in classi della perdita di suolo proposta da Stone e Hilborn (2000)

Classe di erosione	Perdita di suoli ($t\ ha^{-1}\ anno^{-1}$)
Molto bassa	< 7.0
Bassa	7.0 – 11.0
Moderata	11.0 – 22.0
Alta	22.0 – 34.0
Severa	> 34.0

In base alla mappa di erosione, sono state calcolate le aree del bacino interessate dal processo erosivo. Da tali calcoli è risultato che:

◇ il 44% è interessato da un'erosione molto bassa;

- ◇ il 6% è interessato da un'erosione bassa
- ◇ il 12% è interessato da un'erosione moderata;
- ◇ il 10% è interessato da un'erosione alta;
- ◇ **il 28% è interessato da un'erosione severa.**

In particolare, presentano un'erosione severa il territorio della zona “collinare” del bacino (cfr. fig. 4.23) ed alcune zone sparse della parte montana.

È possibile effettuare un'analisi di questo dato considerando che:

1. nella zona montana il processo erosivo è influenzato fortemente sia dal fattore topografico che dall'elevato valore di erosività della pioggia che, in tale zona, presenta il suo valore massimo. Tali fattori tuttavia, sono contrastati da un'efficiente copertura vegetale del territorio che limita fortemente il propagarsi del fenomeno erosivo;
2. nella zona collinare, sebbene sia il fattore topografico che l'erosività della pioggia siano leggermente più bassi rispetto alla zona montana, la copertura del territorio risulta più scarsa, ovvero presenta delle colture che esercitano una copertura del suolo più limitata e dunque incapace di contrastare il propagarsi del fenomeno erosivo.

I versanti collinari, dunque, sono quelli più esposti al fenomeno erosivo e su di essi bisognerà concentrare gli interventi atti a mitigare la perdita di suolo per erosione.

La quantità di suolo eroso calcolata con la RUSLE rappresenta la cosiddetta “*gross erosion*” mentre la quantità di suolo eroso che va realmente a depositarsi all'interno dei corsi d'acqua costituisce la “*net erosion*” e rappresenta una piccola percentuale della prima (Onori et al., 2006).

Il rapporto tra la “*net erosion*” e la “*gross erosion*” è definito come “*coefficiente di resa solida*” o più comunemente *SDR* (acronimo del termine *Sediment Delivery Ratio*) (Bagarello & Ferro, 2006).

Tale coefficiente è influenzato da numerosi fattori quali, ad esempio:

1. **Il tipo di erosione** - Tra i diversi tipi di erosione, quella che interessa direttamente i rami della rete idrografica provoca la formazione di materiali più facilmente trasportabili rispetto a quelli originatisi per erosione sui versanti, che possono muoversi, invece, solo per piccole distanze e permanere in loco anche per lunghi periodi, soprattutto se le aree di origine dei sedimenti non sono sufficientemente prossime ai rami della rete idrografica.
2. **Le caratteristiche del bacino idrografico e del sistema di trasporto dei sedimenti** – Il trasporto del materiale eroso risulta fortemente condizionato dalle caratteristiche del sistema di

trasporto (rete idrografica, versanti). Quanto più ramificato è il reticolo idrografico e, quindi, quanto più elevata è la densità di drenaggio, tanto maggiore risulta il coefficiente di resa solida del bacino, in quanto il materiale eroso raggiunge più facilmente gli elementi della rete idrografica e, attraverso questa, viene veicolato fino alla sezione di chiusura.

La resa solida di un bacino è inoltre influenzata dalla superficie e dalla pendenza media; infatti essa diminuisce al crescere della superficie ed aumenta con la pendenza del bacino. Ciò è correlabile al fatto che, se la superficie è grande, le zone di maggiore produzione di sedimenti (generalmente quelle montane) risultano più distanti dalla sezione di chiusura, dove l'acclività media del bacino diminuisce, e le zone preferenziali di deposito del materiale eroso aumentano. Inoltre, l'allontanamento dei materiali solidi attraverso la rete idrografica diviene meno efficiente. Di contro, al crescere dell'acclività media del bacino, sia riferita ai versanti che ai corsi d'acqua, il trasporto e l'allontanamento dei materiali erosi risultano facilitati.

3. La tessitura del materiale eroso - Generalmente, l'allontanamento dei materiali più grossolani, originatisi prevalentemente per erosione dei rami della rete idrografica, richiede valori della velocità della corrente relativamente elevati, tanto che gran parte del materiale grossolano è soggetto a fenomeni di rideposizione in alveo quando si verifica una diminuzione significativa della velocità della corrente veicolante. I materiali più fini, formati soprattutto per erosione dei versanti, tendono invece a rimanere in sospensione nella corrente e a raggiungere quindi più facilmente la sezione terminale.

Ovviamente, la resa solida varia considerevolmente all'interno di uno stesso bacino, a causa della variabilità spaziale dei diversi fattori da cui dipendono i processi di erosione e di produzione dei sedimenti. (*Bagarello & Ferro, 2006*).

Ai fini applicativi è utile individuare, per il calcolo del coefficiente di resa solida, un criterio di stima del valore medio annuo per un dato bacino idrografico.

Negli U.S.A., Walling (1983) ha proposto la seguente relazione, per evidenziare la correlazione tra il valore medio annuo SDR_w e la superficie del bacino imbrifero:

$$SDR_w = k S_w^n \quad [1]$$

in cui SDR_w è adimensionale, S_w è la superficie del bacino espressa in Km^2 , k ed n sono due costanti numeriche.

Tale relazione è stata verificata in diverse parti del mondo, calibrando i coefficienti in funzione dei dati sperimentali. In Sicilia, la calibrazione è avvenuta attraverso lo studio di 15 bacini

con superficie compresa tra 10 e 232 Km², ottenendo valori di k pari a 5.371 e valori di n pari a -0,6953 (*Bagarello et al., 1991*).

Non avendo a disposizione misure sperimentali che permettano di ricavare i valori di k e n, si è ritenuto comunque opportuno stimare l'SDR per il bacino del Tusciano utilizzando le stesse costanti ottenute per i bacini siciliani, al fine di ottenere una valutazione sia pur grossolana. Applicando tale formula si otterrebbe il seguente valore di SDR:

$$\text{SDR} = 5.371 * 260,74^{-0,6953} = 0,112$$

Il valore dell'SDR è stato inoltre ricavato dal rapporto tra la “net erosion” stimata con il metodo di Gavrilovic e la “gross erosion” stimata con la RUSLE.

La *net erosion* stimata con il metodo di Gavrilovic è pari a 104178,84 m³/anno mentre la *gross erosion* stimata con la RUSLE è risultata 1486231,23 t/anno. Per confrontarle è stato necessario trasformare la “gross erosion” da t/anno a m³/anno dividendo la quantità di suolo eroso per la densità media apparente del suolo che è pari a 1,07 g/cm³ (cfr. tabella 4.4). Il risultato cui si è pervenuti è stato di 1389001,15 m³/anno

Il valore di SDR ottenuto è stato il seguente:

$$\text{SDR} = \frac{\text{"net_erosion"}}{\text{"gross_erosion"}} = 0,075$$

I risultati ottenuti indicano che, calcolando il coefficiente di resa solida utilizzando la relazione [1], si ha che l'11,2% del suolo eroso raggiunge la sezione di chiusura, cioè 155568,13 m³/anno, mentre calcolando il coefficiente di resa solida dal rapporto tra “net erosion” e “gross erosion”, si ottiene che il 7,5% del suolo eroso raggiunge la sezione di chiusura, cioè circa **1.389.000 m³/anno di suolo raggiungeranno la sezione di chiusura.**

Un altro confronto può essere effettuato con il valore del trasporto torbido unitario ottenuto con il metodo di Ciccacci e riportato nel cap. 5.

La stima del trasporto torbido unitario ottenuta per il bacino del Tusciano è pari a 160,23 tonn/km² anno che, moltiplicata per l'area del bacino pari a 260,72 Km², corrisponde a 41775,16 tonn/anno, ossia 39042,20 m³/anno

Da tali stime, deriva che il valore di SDR è pari a:

$$\text{SDR} = 39042,20 / 1389001,15 = 0,028$$

Ciò significa che considerando come “net erosion” quella calcolata con il metodo di Ciccacci, il coefficiente di resa solida per il bacino del Tusciano sarebbe pari al 2,8%, cioè del suolo eroso soltanto il 2,8% raggiungerebbe la sezione di chiusura.

La differenza tra i valori del SDR ottenuti utilizzando il metodo di Gavrilovic e quello di Ciccacci è attribuibile al fatto che l'SDR risente degli effetti dei fattori citati in precedenza (tipo di erosione, tessitura del materiale eroso e granulometria, caratteristiche del bacino idrografico e del sistema di trasporto dei sedimenti), che vengono presi in considerazione nel metodo di Gavrilovic ma non nel metodo di Ciccacci. Inoltre, quest'ultimo fornisce un risultato "sottostimato" rispetto alla realtà, in quanto considera solo ciò che viene trasportato in sospensione, trascurando il trasporto di fondo (cfr. par. 5.4).

CAPITOLO 5

ANALISI GEOMORFICA QUANTITATIVA

Par. 5.1. – L'approccio quantitativo in geomorfologia fluviale

Per lungo tempo lo studio delle forme del rilievo è stato basato su osservazioni di tipo puramente descrittivo, senza prevedere l'utilizzo di *metodi quantitativi*. A differenza di quanto è avvenuto per alcune discipline affini, quali la climatologia e l'idrologia, lo studio delle forme del paesaggio e dei processi geomorfologici è stato affiancato dall'analisi quantitativa e dall'uso di metodi statistico-matematici soltanto a partire dagli anni Cinquanta.

Tra i vari settori della geomorfologia, il primo a giovare delle potenzialità di un approccio quantitativo è stato quello fluviale. Il più consistente impulso alle analisi di tipo quantitativo coincide con la pubblicazione sul Bollettino della Società Geologica Americana di un articolo di **Horton (1945)** sull'analisi dei fenomeni erosivi nei bacini fluviali, che definisce una serie di parametri fisiografici misurabili ai fini della valutazione dell'entità dei processi di erosione. È proprio in questo lavoro che vengono definiti una serie di parametri relativi ai reticoli idrografici e ai bacini di drenaggio, quali, ad es., *l'ordine gerarchico*, la *densità di drenaggio* e la *frequenza delle aste fluviali* da misurare, in parte sulle carte topografiche e in parte sul terreno. Tali parametri furono impiegati successivamente in una serie di relazioni matematiche volte alla valutazione quantitativa della capacità di infiltrazione delle acque superficiali, del tasso di erosione, etc.

Successivamente i concetti e le definizioni di Horton furono ripresi e approfonditi da **Strahler (1952, 1958, 1965)**. Quest'ultimo, in particolare, analizzò le proprietà lineari delle reti idrografiche, le proprietà areali dei bacini idrografici e le caratteristiche del rilievo, introducendo l'applicazione di tecniche statistiche, e definì le linee guida per uno sviluppo della geomorfologia su basi dinamiche e quantitative, attraverso leggi e modelli matematici mediante i quali fosse possibile spiegare le cause dei processi geomorfologici e analizzare l'evoluzione delle forme del rilievo.

Par. 5.2. – Gerarchizzazione dei reticoli idrografici

I bacini idrografici possono essere studiati da un punto di vista **morfometrico**, cioè attraverso la definizione delle loro caratteristiche geometriche. A tal fine Strahler individua tre tipi di parametri utili per la descrizione morfometrica di un bacino idrografico:

- a) lineari;
- b) areali;
- c) del rilievo.

I parametri che descrivono le **proprietà lineari** comprendono la lunghezza (intesa come proiezione su un piano orizzontale), il numero e l'ordine gerarchico dei corsi d'acqua, mentre la larghezza delle aste fluviali viene generalmente considerata infinitesima.

I parametri che descrivono le **proprietà areali** sono rappresentati dalle aree superficiali dei bacini (proiettate su un piano orizzontale) e includono la descrizione della forma dei bacini stessi.

I parametri che descrivono le **proprietà del rilievo** sono costituiti dalla quota di determinati punti del bacino idrografico, dal dislivello fra due punti dati, dalle pendenze delle aste fluviali e dei versanti.

I parametri suddetti influenzano in modo determinante le modalità e l'intensità dei processi di erosione, trasporto e sedimentazione fluviale.

La geometria e lo stato di organizzazione di un reticolo idrografico possono, invece, essere espresse quantitativamente mediante una serie di parametri, quali l'ordine gerarchico delle aste fluviali, il rapporto di biforcazione, il rapporto di biforcazione diretto, l'indice di biforcazione, l'indice e la densità di anomalia gerarchica. Tali parametri, che verranno di seguito definiti, sono strettamente dipendenti dalle caratteristiche litologiche, tettoniche, morfologiche, climatiche e vegetazionali dei bacini idrografici considerati e, pertanto, possono rendere conto dei processi erosivi in atto e potenziali.

L'**ordine gerarchico** dei corsi d'acqua (u), costituisce una proprietà lineare di un sistema fluviale. Il reticolo idrografico può essere suddiviso in segmenti o aste fluviali cui viene attribuita una gerarchia (**Horton, 1945; Strahler, 1952**). Ogni segmento senza affluente, cioè alimentato soltanto dal ruscellamento diffuso e/o da sorgenti, costituisce un elemento di primo ordine. Dalla confluenza di due segmenti di 1° ordine si origina un'asta fluviale di 2° ordine; dalla confluenza di due segmenti di 2° ordine si ottiene un elemento di 3° ordine e così via (**Strahler, 1952**). Qualora un segmento di ordine (u) incontri un segmento di ordine successivo

($u + 1$, $u + 2$ etc.), non si verifica l'incremento di ordine gerarchico. Nella fig. 5.1 è riportata la gerarchizzazione del reticolo idrografico del bacino del fiume Tusciano dalla quale è possibile evincere che l'ordine gerarchico più alto è pari a 6.

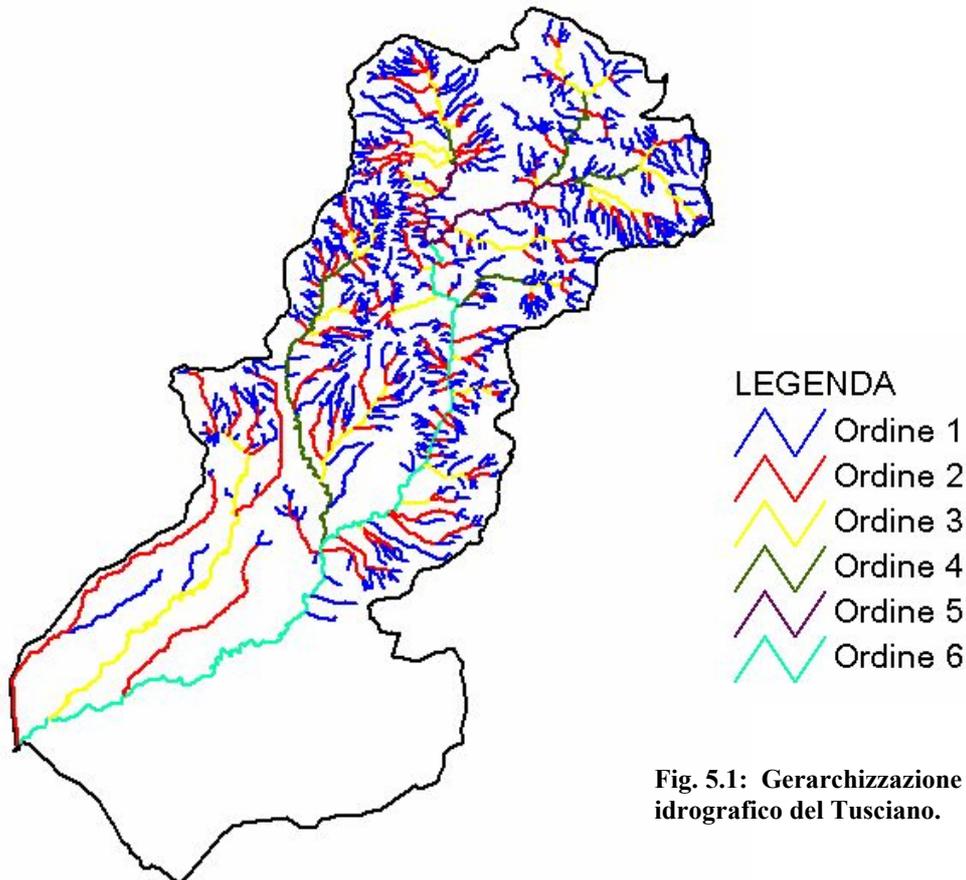


Fig. 5.1: Gerarchizzazione del reticolo idrografico del Tusciano.

Un bacino idrografico si dice perfettamente gerarchizzato quando ogni asta (u) confluisce in un'asta di ordine immediatamente superiore ($u + 1$). Dalla fig. 5.1 è evidente che il bacino idrografico del fiume Tusciano non è un bacino perfettamente gerarchizzato.

Un altro parametro fondamentale per la descrizione della struttura del reticolo fluviale è il **rapporto di biforcazione** (R_b), inteso come il rapporto tra il numero dei segmenti fluviali di un dato ordine (N_u) e il numero dei segmenti dell'ordine immediatamente successivo (N_{u+1}) (*Horton, 1945*):

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}}$$

Il valore di tale rapporto oscilla generalmente tra 3 e 5 (*Avena e Lupia Palmieri, 1969, Lupia Palmieri, 1998*), mentre valori maggiori indicano che il bacino è notevolmente disorganizzato, cioè sono caratteristici di bacini fortemente dissecati e con modesta organizzazione gerarchica. Tale disorganizzazione potrebbe essere imputata ad un controllo tettonico (*Avena et al., 1967*). Bisogna, però, tener presente che il sistema di calcolo del rapporto di biforcazione tiene conto di tutti i segmenti fluviali piuttosto che della reale influenza dei segmenti di un dato ordine su quelli dell'ordine immediatamente superiore.

Considerando i limiti di rappresentatività che caratterizzano tale parametro, si è ritenuto necessario calcolare anche il **rapporto di biforcazione diretto** (R_{bd}), secondo quanto suggerito da *Avena et al. (1969)*. Questo parametro è definito come il rapporto tra il numero di segmenti fluviali di un dato ordine che confluiscono in segmenti dell'ordine immediatamente superiore (N_{du}) ed il numero di questi ultimi (N_{u+1}).

$$R_{bd} = \frac{N_{du}}{N_{u+1}}$$

In realtà, anche il rapporto di biforcazione diretto non costituisce da solo una grandezza completamente rappresentativa del grado di gerarchizzazione; infatti, bacini aventi lo stesso rapporto di biforcazione possono essere organizzati diversamente per la presenza di influenze gerarchicamente anomale, date da quelle situazioni in cui i segmenti di ordine u non confluiscono in segmenti di ordine $u+1$.

Al fine di mettere a confronto tutti i segmenti presenti nel reticolo con quelli collegati in regolare successione gerarchica e di mettere in risalto l'incidenza delle influenze anomale, può essere utile ricavare l'**indice di biforcazione**, derivandolo dalla differenza dei due parametri precedenti (*Avena et al., 1969*).

$$R = R_b - R_{bd}$$

L'indice di biforcazione è, però, un parametro da valutare con attenzione in quanto non sempre il suo valore corrisponde ad un bacino con una condizione di gerarchizzazione normale; infatti, dipendendo dai due parametri prima citati, se entrambi risultano elevati la loro differenza sarà un valore basso.

Per il bacino del Tusciano il valore dell'indice di biforcazione, R , è risultato essere pari a 0,982.

Per confrontare l'organizzazione gerarchica di bacini idrografici diversi è stata analizzata la distribuzione delle confluenze anomale nei vari ordini e, pertanto, sono stati introdotti alcuni parametri significativi quali:

- il **numero di anomalia gerarchica (G_a)**, che corrisponde al numero minimo di segmenti fluviali di primo ordine necessari a rendere il reticolo idrografico perfettamente gerarchizzato;
- la **densità di anomalia gerarchica (g_a)**, definita come il rapporto tra il numero di anomalia gerarchica (G_a) e l'area del bacino (A). Tale parametro è utile per confrontare bacini con aree diverse (Avena et al., 1967).

Modesti valori di g_a sono tipici di bacini caratterizzati da reticoli ben organizzati, in cui i processi di erosione sono prevalentemente di tipo lineare, cioè opera delle acque incanalate, mentre l'erosione areale risulta subordinata. Si può affermare il contrario per alti valori di g_a (>30), che testimoniano intensi processi erosivi di tipo calanchivo.

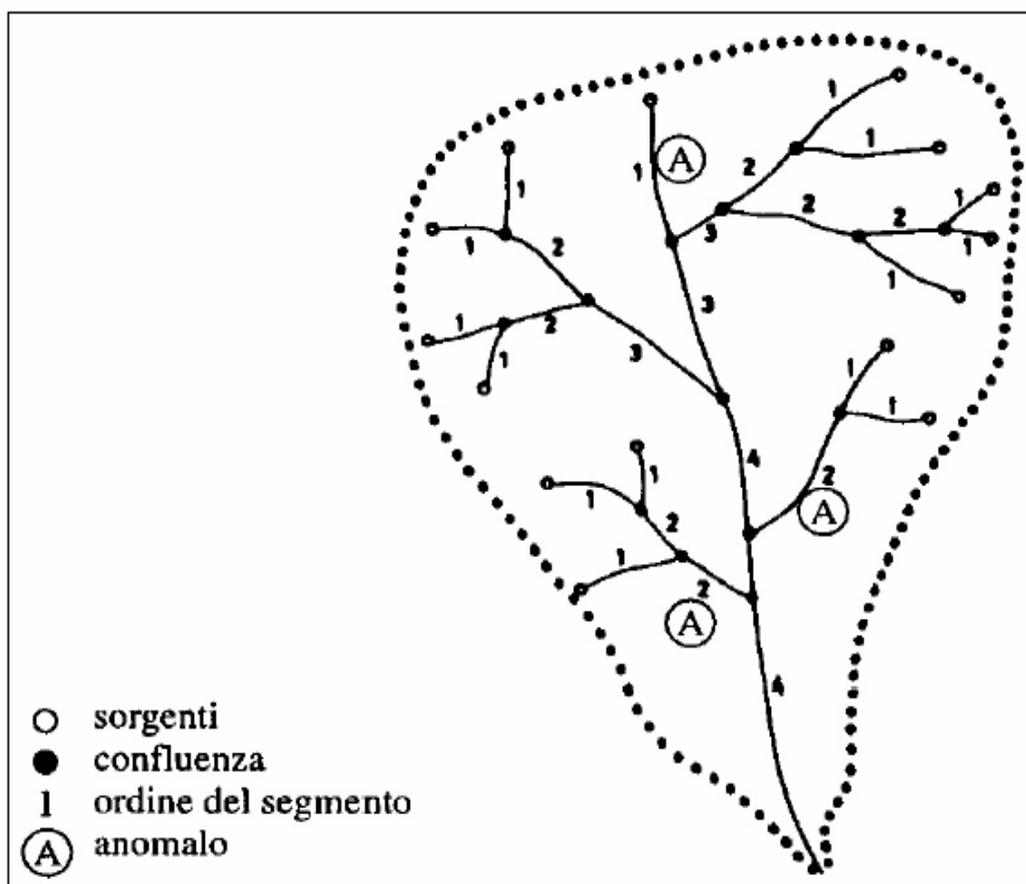


Fig. 5.2: Schematizzazione di un reticolo idrografico e indicazione dei punti di anomalia gerarchica

Ad esempio, con riferimento al reticolo idrografico, riportato in fig. 5.2, il numero di anomalia gerarchica è pari a 3. *Nel caso del bacino del fiume Tusciano (fig. 5.1), il numero di anomalia gerarchica è pari a 1130, mentre il valore della densità di anomalia gerarchica è pari a 4,334.*

Infine, si ha l'*indice di anomalia gerarchica (Δa)* che è dato dal rapporto tra il numero di anomalia gerarchica (G_a) e il numero di elementi di primo ordine del reticolo (N_1).

In riferimento alla fig. 5.2, ad esempio, il valore dell'indice di anomalia gerarchica è pari a 0,2 mentre per il bacino del fiume Tusciano è risultato pari a 1,899.

Questo parametro risulta più sensibile del precedente agli effetti della neotettonica; infatti, quanto maggiore è l'influenza di quest'ultima tanto più elevato sarà il valore di questo indice.

In generale, comunque, valori bassi dei parametri relativi alle anomalie gerarchiche si riscontrano in bacini con una buona organizzazione gerarchica, mentre valori elevati sono tipici di bacini caratterizzati dalla presenza di terreni argillosi e/o da una scarsa copertura vegetale e/o da un'intensa attività neotettonica.

Un riepilogo dei valori dei parametri citati, ottenuti per il bacino del fiume Tusciano, è stato riportato in tab. 5.1.

Par. 5.3. – Analisi morfologica dei bacini idrografici

Sono stati definiti da vari autori una serie di parametri che esprimono quantitativamente le caratteristiche morfometriche dei bacini idrografici. Alcuni di questi, che verranno di seguito descritti, risultano particolarmente significativi nello studio dei processi erosivi in generale e nella valutazione quantitativa dell'erosione, in particolare.

Allo scopo di definire dal punto di vista quantitativo la forma di un bacino di drenaggio sono stati introdotti i seguenti parametri caratterizzanti il bacino:

- **Rapporto di allungamento (R_e)** che consiste nel rapporto tra il diametro (d) di un cerchio avente la stessa area del bacino considerato e la lunghezza massima del bacino (L) misurata nella direzione dell'asta principale (**Schumm, 1956**):

$$R_e = \frac{d}{L}$$

Dal punto di vista teorico R_e risulta compreso tra 0 e 1 ; valori prossimi a 1 si ottengono per bacini la cui forma è pressoché circolare, mentre i valori più bassi si riferiscono a bacini con forma allungata; appare evidente che 0 è un valore limite puramente teorico. Nel caso del bacino del Tusciano il valore del rapporto di allungamento e/o elongazione è pari a 0,622.

- **Rapporto di circolarità (R_c)** che è dato dal rapporto tra l'area di un dato bacino (A_b) e l'area del cerchio (A_c) avente lo stesso perimetro del bacino (**Strahler, 1958**):

$$R_c = \frac{A_b}{A_c}$$

Per il bacino del Tusciano tale parametro è pari a 0,358, anche se in realtà questo parametro è maggiormente significativo se la direzione della lunghezza massima del bacino non corrisponde a quella dell'asta principale.

Un altro parametro riguardante gli aspetti areali di un bacino è la **frequenza dei corsi d'acqua (F)**, definita come il rapporto tra il numero di aste fluviali di un bacino (N) e l'area del bacino stesso (A) (**Horton, 1945**):

$$F = \frac{N}{A}$$

Tale parametro per il bacino del Tusaciano assume il valore di 3,03.

La **densità di drenaggio (D)** è, invece, una grandezza che correla una proprietà lineare di un bacino con una proprietà areale, e costituisce uno dei parametri morfometrici più significativi ai fini della valutazione quantitativa dell'erosione nei bacini fluviali. Tale parametro è definito

come il rapporto tra lunghezza totale dei segmenti fluviali di un dato bacino (L) e l'area del bacino stesso (A):

$$D = \frac{\sum L}{A}$$

La densità di drenaggio (D) è direttamente proporzionale all'intensità delle precipitazioni e all'acclività dei versanti (*Horton, 1945*). In relazione alle caratteristiche litologiche, invece, la densità di drenaggio è direttamente proporzionale all'erodibilità e inversamente proporzionale alla permeabilità dei terreni affioranti, come indicato nella fig 5.3.

Inoltre, a parità di litotipo, terreni fratturati presentano generalmente dei valori di densità di drenaggio più elevati, a meno che le discontinuità non siano tali da convogliare in profondità le acque di scorrimento superficiale.

Relativamente alla copertura vegetale, la proporzionalità è inversa e, pertanto, a parità di altre condizioni, i valori più bassi di D si riscontrano laddove la vegetazione è più fitta. Infine, l'antropizzazione può avere, un effetto diverso a seconda del tipo di intervento. Ad esempio, ad un'ampia area edificata, caratterizzata da una rilevante superficie impermeabilizzata, corrispondono valori di densità di drenaggio relativamente bassi, mentre in un'area disboscata la densità di drenaggio aumenta rapidamente.

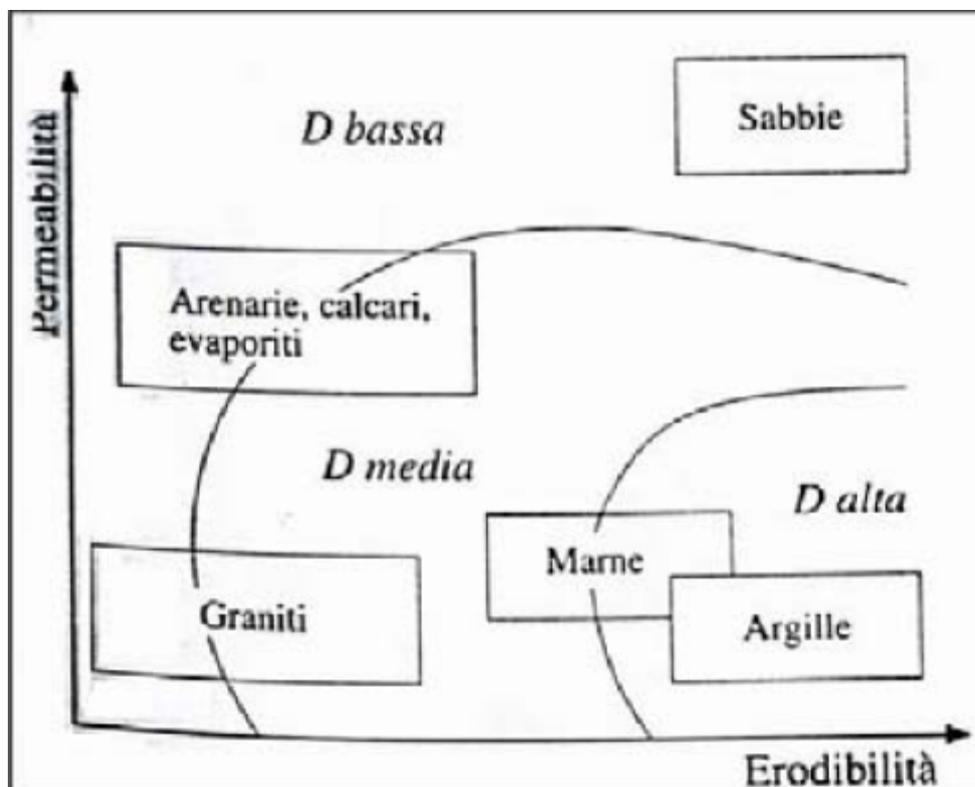


Fig. 5.3.: Variabilità della densità di drenaggio in relazione all'erodibilità e alla permeabilità di diversi. (Fonte: Zaccagnini, 2005)

Dal punto di vista pratico, valori elevati di questo parametro si rilevano per rocce calcaree interessate da fenomeni carsici che favoriscono l'infiltrazione preferenziale delle acque in cavità e/o condotti.

Dal punto di vista numerico, si considerano i seguenti range:

- Valori bassi: compresi tra 0 e 4 km/km²;
- Valori medi: compresi tra 4 e 6 km/km²;
- Valori alti: compresi tra 6 e 10 km/km².

Il valore della densità di drenaggio per il bacino del Tusciano è pari a 2,082 che rientra nella classe dei valori bassi.

Ciccacci et al. (1980) hanno rappresentato la densità di drenaggio in carte specifiche, attraverso due tipi di rappresentazione:

- ***rappresentazioni a isolinee***, in cui curve di isodensità del drenaggio uniscono punti di eguale valore di D;
- ***rappresentazioni a mosaico***, in cui con maglie quadrate colorate vengono indicate diverse classi di densità di drenaggio.

I due tipi di rappresentazione sono spesso coesistenti.

Attualmente, invece, l'introduzione dei sistemi GIS nelle elaborazioni di geomorfologia fluviale quantitativa ha permesso di ottenere delle carte in cui i valori di D variano per ogni punto del bacino. Si ottengono cioè delle rappresentazioni a mosaico in cui la maglia è rappresentata dal *pixel* del modello raster che si sta utilizzando.

Da vari autori sono stati individuati parametri che definiscono le proprietà del rilievo di un bacino idrografico; questi riguardano, in particolare, la pendenza dei versanti e delle aste fluviali (***Horton, 1945; Strahler, 1952; Schumm, 1956***).

Il parametro più significativo ai fini dell'analisi quantitativa dell'erosione è il ***gradiente di pendio (θ)*** delle aste fluviali, definito come il rapporto tra il dislivello dei punti estremi di un segmento fluviale e la sua lunghezza (***Horton, 1945***). Il valore medio di questo parametro relativamente ad un bacino può essere, in alcuni casi, assimilato all'acclività media del bacino stesso. Il valore di θ dà conto della velocità e, quindi, dell'energia e della pendenza di un corso d'acqua (secondo un rapporto di proporzionalità diretta); in genere, a parità delle altre condizioni, ad un elevato gradiente di pendio corrisponde un maggiore trasporto solido.

I valori di gradiente di pendio delle aste fluviali diminuiscono all'aumentare dell'ordine gerarchico secondo una funzione esponenziale negativa. Analogamente a quanto visto per le

lunghezze dei corsi d'acqua e le aree dei bacini, anche per quanto riguarda l'acclività può essere individuato un **rapporto di pendenza** R_θ , definito dalla relazione:

$$R_\theta = \frac{\overline{\theta}_u}{\theta_{u-1}}$$

dove $\overline{\theta}_u$ è il gradiente di pendio medio delle aste di ordine gerarchico u . Tale valore si aggira generalmente tra 0,3 e 0,6; per definizione è comunque inferiore a 1. Con modalità simili a quelle viste per le carte della densità di drenaggio, possono essere compilate carte dei gradienti di pendio, con rappresentazioni a mosaico (con individuazione di classi) e/o a isolinee (con una determinata equidistanza) (*Ciccacci et al., 1980*).

Anche in questo caso l'elaborazione delle carte a isolinee e le rappresentazioni a mosaico sono state sostituite dall'elaborazione di carte mediante software come Arcview o Arc Gis che permettono, a partire dall'elaborazione dei dati di input, di ricavare delle carte di facile leggibilità e immediata interpretazione.

Un altro parametro relativo alle proprietà del rilievo è costituito dal **rapporto di rilievo** (R_H), dato dal rapporto tra il dislivello massimo di un bacino e la massima lunghezza di quest'ultimo misurata lungo la linea principale di drenaggio (*Schumm, 1956*). Valori prossimi allo zero si riferiscono in genere a bacini molto evoluti, con dislivelli tra testata e foce delle aste fluviali molto ridotti ed elevate lunghezze dei corsi d'acqua (*Avena et al., 1967*).

È questo il caso del bacino del Tusciano per il quale è risultato un valore del rapporto di rilievo pari a 0,061.

Per l'analisi orografica di un bacino viene utilizzata anche l'**energia del rilievo** (E_r) definita come il dislivello massimo (in metri) relativo ad una porzione di territorio unitaria (generalmente 1 km^2). A parità di altre condizioni, ad alti valori di energia del rilievo corrispondono in genere processi di erosione più intensi. La distribuzione di questo parametro può essere rappresentata su carta attraverso un cartogramma a mosaico, costituito da quadrati di superficie unitaria colorati a seconda delle classi di appartenenza. Tali classi sono determinate caso per caso in base alle caratteristiche altimetriche della zona studiata (*cfr. Ciccacci et al., 1988; Lupia Palmieri et al., 1995, 1998*).

È evidente che tutti i parametri qui menzionati possono essere desunti in automatico tramite i sistemi GIS con una notevole precisione laddove si dispone di un modello digitale del terreno di dettaglio (es. a 10-20 m).

Par. 5.4. – Analisi quantitativa

L'analisi quantitativa dell'entità dell'erosione nei bacini fluviali può essere condotta attraverso misure dirette e indirette, volte alla valutazione del trasporto solido, quale espressione significativa dei processi erosivi in atto o potenziali.

Le **misure dirette** prevedono l'utilizzo di strumenti misuratori da posizionare lungo le aste fluviali; esse vengono generalmente eseguite in aree campione e per limitati periodi di tempo. Anche se consentono di ottenere risultati attendibili, a differenza delle misure indirette, sono difficilmente estendibili ad ampi territori, in considerazione dei tempi necessari e dei costi da affrontare, pertanto il loro impiego risulta puntuale e inevitabilmente sporadico, oltre che relativamente costoso (**Ferretti, 1979**).

Le **misure indirette** permettono, invece, una valutazione dell'entità di erosione potenziale di ampie aree tramite l'impiego di relazioni matematiche, previa analisi geomorfica quantitativa dei bacini idrografici considerati. Le misure indirette, non necessitando l'utilizzo di strumenti *in situ*, sono applicabili a territori relativamente vasti e risultano generalmente indicate per l'ottimo rapporto costi-benefici. Generalmente, come parametro rappresentativo dell'entità dell'erosione, è stato considerato il trasporto solido che, seppure con una certa approssimazione, può essere assimilato alla quantità di materiale eroso dai versanti da parte dei corsi d'acqua. Per i bacini idrografici in cui esistono stazioni di misura, i dati ottenuti con i metodi indiretti possono essere confermati e tarati soltanto con quelli relativi al «trasporto torbido» (o trasporto in sospensione), escludendo le componenti trasporto di fondo e/o in soluzione, poiché queste sono misurate soltanto in rari casi. Comunque, in zone a clima temperato o umido, come quello dell'area di studio, la differenza tra i due tipi di trasporto è limitata. In zone aride o semiaride gioca, invece, un ruolo molto importante il trascinarsi sul fondo, mentre in zone calcaree non è affatto trascurabile il trasporto in soluzione, che può superare il 20% del trasporto totale (**Angelucci et al., 1969**): è evidente che in queste ultime due situazioni l'assimilazione dei due tipi di trasporto non risulta corretta. I dati relativi al trasporto torbido quale indice dell'intensità dei processi erosivi sono comunque quelli più frequentemente disponibili e, pertanto, utilizzati nella maggior parte dei casi come termine di confronto nello studio delle variabili che influenzano l'entità dell'erosione.

A partire dalla fine degli anni '60, sono state avviate ricerche sistematiche volte alla definizione e all'applicazione di relazioni matematiche per una valutazione quantitativa indiretta dell'erosione (**Avena & Lupia Palmieri, 1969; Ciccacci et al. 1980; Lupia Palmieri, 1983;**

Ciccacci et al, 1988; Lupia Palmieri et al. 1995, 1998). Tali ricerche, basate sull'analisi delle caratteristiche morfometriche dei bacini considerati, hanno fornito indicazioni significative sull'entità dell'erosione in aree campione dell'Italia centrale. L'entità dell'erosione potenziale, detta *indice di erosione*, è assimilata al “*deflusso torbido unitario medio annuo*” (Tu , espresso in $t/Km^2/anno$). Per il calcolo di quest'ultimo vengono utilizzate opportune relazioni matematiche nelle quali, a seconda dei casi, possono comparire indici climatici, parametri geomorfici e parametri relativi alla gerarchizzazione del reticolo, dai quali l'indice di erosione è strettamente dipendente. L'introduzione di parametri climatici nelle relazioni di cui sopra si rende necessaria qualora i bacini considerati presentino condizioni climatiche diverse.

Fournier (1960), ad esempio, confrontando i dati torbidometrici di un centinaio di bacini idrografici posti in diverse zone della Terra, ha definito l'indice ($FI = p^2/P$), in cui p rappresenta le precipitazioni del mese più piovoso e P le precipitazioni totali annue. Ai fini dell'individuazione dei rapporti fra erosione e clima, si è rivelato in seguito più efficace l'*indice pluviometrico* $P \times \sigma$ (*Ciccacci et al., 1977*), in cui P rappresenta le precipitazioni totali annue e σ la deviazione standard dalla media delle precipitazioni mensili. Tale indice può fornire utili indicazioni indirette, se non sull'entità almeno sulle variazioni di intensità del trasporto torbido anche per bacini privi di stazioni torbidometriche.

La relazione che lega i valori di Tu al valore del trasporto torbido unitario è stata ricavata nell'ambito dello studio effettuato su 14 bacini idrografici italiani, e per il T. Senio è la seguente:

$$\log Tu = -1,43 + 0,93 \log (P \times \sigma)$$

con un coefficiente di correlazione pari a 0,73. Nell'ambito dello studio è tuttavia emerso che esiste un discreto legame tra i valori annui di Tu e di $P \times \sigma$ per cui, la relazione su indicata è utile solo per conoscere le variazioni dell'entità del trasporto fluviale in un determinato bacino idrografico al variare delle condizioni climatiche.

Infine, gli indici climatici non sono calcolabili per piccoli bacini o aree parziali; pertanto per valutare l'entità dell'erosione nelle varie parti di un bacino si rende necessario prendere in considerazione i più significativi parametri geomorfici, quali il gradiente medio di pendio dei segmenti fluviali e la densità di drenaggio, e parametri relativi alla gerarchizzazione dei reticoli idrografici, in particolare quelli già definiti, relativi alle anomalie gerarchiche, che consentono di avere indicazioni sul contributo delle singole aree del bacino considerato al trasporto torbido complessivo nel corso d'acqua principale.

Alcune delle relazioni ricavate da *Ciccacci et al. (1980)* presentano coefficienti di correlazione molto alti, per cui possono essere utilizzate con attendibilità nel calcolo indiretto del trasporto torbido.

Per un corso d'acqua privo di stazioni di misura è possibile, quindi, effettuare il calcolo dell'entità del trasporto torbido sfruttando gli indici geomorfici ricavati per l'intero bacino. Le relazioni utilizzate nel caso del bacino oggetto del nostro studio sono le seguenti:

$$[1] \log Tu = 0,29561 D + 0,00743 ga + 1,56102$$

$$[2] \log Tu = 1,82818 \log D + 0,01769 ga + 1,53034$$

in cui : D = Densità di drenaggio e ga = densità di anomalia gerarchica.

Tali formule presentano un coefficiente di determinazione di 0,946 e forniscono risultati simili per valori di $D < 6$, come nel caso specifico del bacino del Tusciano.

Altre due relazioni che legano il trasporto torbido unitario a parametri geomorfici prevedono, invece, l'utilizzo della densità di drenaggio e dell'indice di anomalia gerarchica e sono le seguenti:

$$[3] \log Tu = 2.79687 \log D + 0.13985 \Delta a + 1.05954$$

$$[4] \log Tu = 0,33479 D + 0,15733 \Delta a + 1,32888$$

in cui : D = Densità di drenaggio e Δa = indice di anomalia gerarchica.

L'entità dei processi erosivi viene rappresentata in specifiche carte tematiche (carte dell'indice di erosione), che generalmente indicano il potenziale deflusso torbido unitario medio annuo da parte di singoli bacini parziali (sottobacini). Per una migliore comprensione delle cause dei processi erosivi tali carte sono di solito accompagnate, oltre che da carte geologiche o geomorfologiche, anche da carte della densità di drenaggio, carte dei gradienti di pendio, carte dell'energia del rilievo, carte della copertura vegetale etc. (*Ciccacci et al., 1980, Lupia Palmieri et al., 1995, 1998*).

L'utilizzo di metodi quantitativi risulta, dunque, di fondamentale importanza nella previsione di processi legati all'azione delle acque correnti superficiali e per la mitigazione dei rischi ambientali connessi. Ad esempio, tramite l'impiego dei metodi di misura indiretta dell'erosione sopra descritti, risulta possibile il calcolo della velocità di interrimento di bacini lacustri, come riportato nello studio di *Ciccacci et al. (1983)* relativo all'interrimento di un bacino artificiale chiuso da una diga costruita dall'ENEL per scopi idroelettrici nel bacino idrografico del Rio Scandarello (Rieti).

Il valore ottenuto con l'analisi geomorfica quantitativa è stato confrontato con quello ricavato dall'esame delle variazioni delle batimetrie fornite dall'ENEL. Lo scarto tra la valutazione indiretta e quella diretta è risultato del 15% circa, ed è stato giustificato dagli Autori considerando il contributo del trasporto di fondo, che nella zona studiata non risulta affatto trascurabile.

È per questo motivo che sono stati applicati i metodi quantitativi per la stima dell'erosione del bacino oggetto del nostro studio, nel quale non sono presenti stazioni torbidometriche per la misura diretta del materiale trasportato in sospensione nei corsi d'acqua.

Par. 5.5. – Stima del trasporto torbido del bacino del fiume Tusciano

Lo step preliminare, necessario per la valutazione della quantità di materiale eroso che viene trasportato dai corsi d'acqua verso la sezione di chiusura del bacino, è stato il calcolo dei parametri prima esposti per il reticolo idrografico del bacino del Tusciano.

La rete idrografica del bacino del Tusciano è stata fornita dal Progetto Operativo Difesa Suolo PON ATAS 2000-2006 del Ministero dell'Ambiente e Tutela del Territorio – Direzione Generale Difesa Suolo – Postazione Cartografica Federata **PODiS Campania** – Unità di Supporto Locale n.6, ed è stata estratta dal DTM maglia 20m × 20m.

Le rete idrografica a disposizione è stata confrontata con le carte topografiche 1:50000 (Eboli, Foce Sele, Roccadaspide e Salerno) per evidenziare eventuali incongruenze o tratti fluviali mancanti. Il confronto ha rilevato scarse discrepanze che non si sono verificate significative ai fini della caratterizzazione del bacino per cui, a partire dalla rete idrografica del bacino e dal DTM (maglia 20m × 20m) forniti dal PODiS si è proceduto all'estrazione automatica di tutti i parametri necessari per l'analisi geomorfica quantitativa. L'estrazione dei parametri geomorfici è stata effettuata con Geomorf_2k1 e Geomorf_2k5, applicativi GIS sviluppati presso il Centro Ricerche ENEA Portici (*De Bonis et al., 2002; Fattoruso et al., 2005*) e ha fornito, relativamente al bacino del fiume Tusciano i parametri riportati in Tab. 5.1.

Tab. 5.1 – Parametri geomorfici relativi al bacino del fiume Tusciano

Parametro	Valore	Unità di misura
Area del bacino	260,74	Km ²
Massima dimensione del reticolo (massima distanza rispetto alla foce, misurata lungo il reticolo idrografico)	41,89	Km
Massima dimensione del bacino (massima distanza rispetto alla foce, misurata rispetto allo spartiacque)	29,31	Km
Quota minima del bacino	0	m s.l.m.
Quota media del bacino	433	m s.l.m.
Quota massima del bacino	1788	m s.l.m.
Numero di aste fluviali	790	---
Numero di anomalie gerarchiche, Ga	1130	---
Numero aste 1° ordine	595	---
Numero aste 2° ordine	155	---
Numero aste 3° ordine	30	---
Numero aste 4° ordine	7	---
Numero aste 5° ordine	2	---
Numero aste 6° ordine	1	---
Frequenza dei corsi d'acqua, F	3,03	Km ⁻²
Densità di anomalie gerarchiche, ga	4,334	---
Indice di anomalie gerarchiche, Δa	1,899	---
Densità di drenaggio, D	2,082	---
Indice di biforcazione, R	0,982	---
Rapporto di elongazione, Re	0,622	---
Rapporto di circolarità, Rc	0,358	---
Rapporto di rilievo, Rh	0,061	---

Per il calcolo del trasporto torbido unitario sono state utilizzate le formule da [1] a [4] citate nel paragrafo precedente (cfr. § 5.4), per cui tra i parametri geomorfici calcolati, sono stati presi in considerazione la densità di drenaggio (D), la densità di anomalia gerarchica (ga) e l'indice di anomalia gerarchica (Δa) In tab. 5.2 sono state riportate le formule applicate e i relativi risultati ottenuti.

Tab. 5.2 – Stima del trasporto torbido per il bacino del fiume Tusciano

Formula utilizzata	Valore Tu	Unità di misura
[1] $\log Tu = 0,29561 D + 0,00743 ga + 1,56102$	161,69	Tonn/Km ² anno
[2] $\log Tu = 1,82818 \log D + 0,01769 ga + 1,53034$	154,61	Tonn/Km ² anno
[3] $\log Tu = 2,79687 \log D + 0,13985 \Delta a + 1,05954$	164,39	Tonn/Km ² anno
[4] $\log Tu = 0,33479 D + 0,15733 \Delta a + 1,32888$	211,20	Tonn/Km ² anno

I valori ottenuti rappresentano il deflusso torbido unitario medio annuo espresso in tonn/(Km² anno).

È possibile evincere dai risultati ottenuti che:

- ▶ il calcolo di Tu effettuato usando come variabili la densità di drenaggio (D) e la densità di anomalia gerarchica (ga) ha fornito risultati discordanti tra loro solo del 4,6%;
- ▶ il calcolo di Tu effettuato con la densità di drenaggio (D) e l'indice di anomalia gerarchica (Δa) ha fornito risultati che scartano del 28,5% circa fra loro. Tuttavia, il risultato ottenuto con la forma logaritmica di D (relazione [3]), fornisce un risultato comparabile con quello ottenuto con i parametri su citati (+6,3%);
- ▶ il valore medio di Tu per il bacino, ottenuto dall'applicazione delle relazioni [1], [2] e [3] è pari a **160,23 tonn/Km² anno** con una deviazione standard di 5,05 tonn/Km² anno.

Questi valori rappresentano sicuramente una sottostima rispetto a ciò che realmente viene apportato dai corsi d'acqua superficiali in quanto, nell'area oggetto di studio, non viene preso in considerazione il trasporto di fondo che fornisce un contributo non del tutto trascurabile.

CAPITOLO 6

INTERVENTI DI MITIGAZIONE

Par. 6.1 – Generalità sugli interventi di mitigazione.

La valutazione dell'importanza del fenomeno erosivo presuppone, in genere, il confronto tra la perdita di suolo effettiva e una *tolleranza* di perdita di suolo. Laddove la perdita di suolo effettiva è maggiore della tolleranza, sarà necessario programmare degli interventi di conservazione del suolo.

La *tolleranza* di perdita di suolo può essere definita sia sulla base di considerazioni *on-site*, cioè facendo ricorso a criteri legati alla superficie erosa (come ad es. il mantenimento dell'attitudine produttiva), sia ricorrendo a valutazioni di tipo *off-site*, cioè in base alle implicazioni che il fenomeno erosivo manifesta nei riguardi delle zone di accumulo dei sedimenti erosi.

Nel primo caso, la tolleranza si attesta su valori di perdita di suolo pari a 13 tonn/anno (***Bagarello & Ferro, 2006***).

Facendo riferimento a quanto indicato da ***Poesen (1999)***, un valore di suolo eroso pari a 13 tonn/anno corrisponde, nel caso dell'Europa, ad un assottigliamento dello strato di suolo di 1 mm/anno. Nel caso dei suoli mediterranei, però, bisognerà ridurre la tolleranza a causa della scarsa profondità e della maggiore lentezza del processo di pedogenesi.

Nella determinazione della quantità di suolo eroso nel bacino del fiume Tusciano effettuata con la RUSLE, hanno concorso i cinque fattori ampiamente illustrati nel capitolo 4.

Per diminuire la quantità di suolo eroso, dunque, lasciando inalterati gli aspetti concernenti l'uso del suolo, si può intervenire solo su due fattori:

1. il fattore topografico, indicato con LS;
2. le pratiche antierosive, indicato con P.

Nel primo caso si interverrà sulla morfologia dei versanti, mentre nel secondo caso si dovranno introdurre opportune pratiche di conservazione del suolo, in relazione alla copertura del territorio.

In questo capitolo, quindi, saranno illustrate alcune delle pratiche agro-forestali e di ingegneria naturalistica, comunemente utilizzate per il controllo dell'erosione, sviluppando altresì, un esempio dell'efficacia di una semplice pratica di gestione del territorio.

In linea generale, una volta stabilita la necessità di attuare delle misure di controllo dell'erosione, si sceglierà in base alle esigenze locali su quale fattore intervenire e quali interventi da realizzare.

Par. 6.2 – I rivestimenti antierosivi

Ad oggi risulta molto diffusa la realizzazione di interventi di sistemazione che prevedono l'impiego di **rivestimenti antierosivi**. La copertura così realizzata consente un'efficace mitigazione dei fenomeni erosivi, proteggendo il terreno dall'azione aggressiva delle acque meteoriche e superficiali, del vento e delle escursioni termiche.

Le opere che più comunemente sono realizzate nell'ambito degli interventi di sistemazione dei versanti sono:

- i rivestimenti antierosivi con materiali biodegradabili;
- i rivestimenti antierosivi con materiali sintetici;
- gli inerbimenti (*APAT, 2002*).

I rivestimenti antierosivi con materiali biodegradabili sono usati quasi sempre in associazione con l'idrosemina o con l'impianto di talee e piantine. Essi sono costituiti in genere da fibre di paglia, cocco, juta, sisal (fibra tessile ricavata dalle foglie di una specie di Agave), trucioli di legno o altre fibre vegetali e caratterizzati da biodegradabilità pressoché totale (che si realizza in un arco di tempo di 1-5 anni), da permeabilità e capacità di ritenzione idrica elevate e da una spiccata azione protettiva superficiale del terreno.

In funzione del materiale, della struttura e delle tecniche costruttive, tali rivestimenti possono essere classificati in:

- *Bioreti (Fig. 6.1);*
- *Biofeltri (Fig. 6.2);*
- *Biostuoie (Fig. 6.3).*

La biodegradabilità e la non tossicità dei materiali utilizzati, unitamente alla capacità di favorire una rapida copertura vegetale, garantiscono il loro inserimento completo e naturale nell'ambiente circostante.

Fig. 6.1 - Particolare di biorete in fibra naturale di juta (a) e in fibra naturale di cocco (b) Fonte: <http://www.harpo-group.com/>

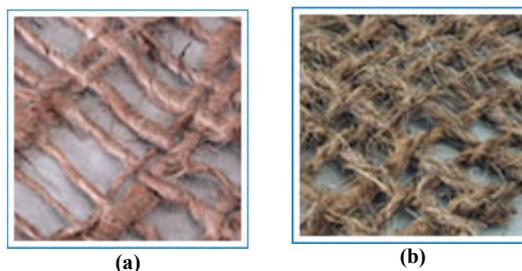


Fig. 6.2 - Particolare di biofeltro in fibre vegetali biodegradabili Fonte: <http://www.harpo-group.com/>



Fig. 6.3 - Particolare di biostuoie in paglia (a), in cocco (b), in fibre vegetali di paglia e cocco (c)

Fonte: <http://www.harpo-group.com/>



(a)



(b)



(c)

I **rivestimenti antierosivi sintetici** sono realizzati con vari tipi di prodotti sia geosintetici che non. Queste tecniche si possono realizzare con prodotti prefabbricati (che svolgono una o più funzioni), oppure abbinando materiali diversi posati in tempi successivi.

Alcuni dei materiali e delle tecniche più comunemente usati sono:

- le *geostuoie tridimensionali* (Fig. 6.4);
- i *geocompositi* (Fig. 6.5);
- i *rivestimenti vegetativi* (Fig. 6.6);
- le *geocelle* (Fig. 6.7).

L'impiego di prodotti formati da materiali di sintesi, soprattutto naturali, offre la possibilità di limitare l'impatto negativo sull'ambiente circostante.

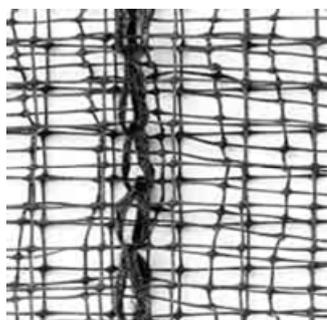


Fig. 6.4 – Esempio di geostuoia tridimensionale in polipropilene
Fonte- www.tenax.net

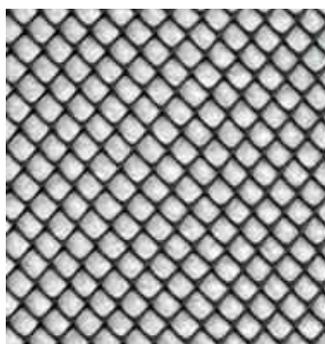


Fig. 6.5 – Esempio di geocompositi (accoppiamento di georeti con capacità drenante con geotessili ad azione filtrante). Fonte- www.tenax.net



Fig. 6.6 – Esempio di feltro vegetativo preseminato
Fonte- www.tenax.net

Questi materiali consentono e favoriscono lo sviluppo di una copertura vegetale stabile in grado di svolgere un'efficace ruolo autonomo di consolidamento superficiale e di rinaturalizzare contesti degradati dalla costruzione di opere di ingegneria (APAT, 2002).

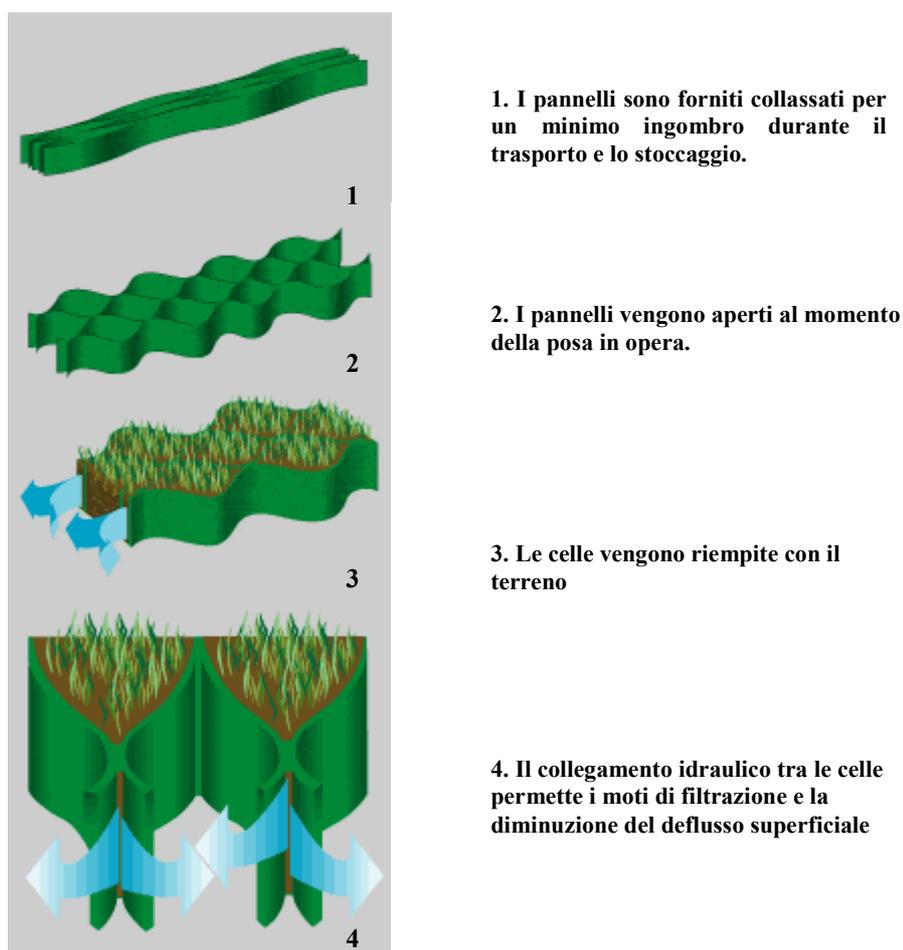


Fig. 6.7 - Schema di funzionamento di una geocella. Fonte- www.tenax.net

La realizzazione di *rivestimenti vegetali (inerbimenti)* (Fig. 6.8) è di norma sufficiente a proteggere gli strati più superficiali del terreno dall'azione aggressiva delle acque correnti meteoriche e superficiali, del vento e delle escursioni termiche. In molti casi lo sviluppo di una copertura vegetale naturale è ostacolato dall'instabilità dello strato superficiale del suolo o dalla scarsità di terreno vegetale ed humus (ad es. sui pendii rocciosi) oppure dall'aridità del clima e dai processi di erosione accelerata. Per vincere la sterilità biologica dei pendii in terra possono essere impiegate varie tecniche di semina o di rivestimenti vegetativi (con zolle o tappeti erbosi e/o con materassi e tasche vegetative).

Generalmente l'inerbimento è abbinato a strutture ausiliarie, che hanno la funzione di ricoprire e fissare la superficie del terreno instabile da trattare. Le tecniche più comuni di inerimento per semina o per posa in opera di rivestimenti vegetali comprendono:

- la semina a spaglio;
- le coperture di zolle erbose;
- il sistema nero-verde;
- l'idrosemina (fig. 6.8).



Fig. 6.8 - Inerbimento mediante la tecnica dell'idrosemina di un'opera di sostegno in terra rinforzata (APAT, 2002)

I rivestimenti antierosivi di pendii e scarpate realizzati con le tecniche d'inerimento sono caratterizzate da un ridotto impatto ambientale e rappresentano, quindi, delle soluzioni indicate nelle zone di particolare pregio ambientale.

Queste tecniche, infatti, se opportunamente realizzate, consentono un ottimo recupero naturale delle aree degradate, favorendo il consolidamento dei pendii, lo sviluppo successivo della copertura vegetale e/o il ripristino degli ecosistemi naturali danneggiati (APAT, 2002).

Par. 6.3 – Interventi che modificano la morfologia dei versanti

Gli interventi che prevedono la ***modifica della morfologia della pendice*** agiscono, invece, modificando il profilo longitudinale oppure interrompendo la continuità dei percorsi idrici.

Gli interventi che *modificano il profilo longitudinale* del versante provocano una riduzione della capacità di trasporto del flusso superficiale e dunque un deposito del materiale che non raggiungerà il corpo recettore. Tuttavia, nel tempo, il materiale depositatosi può provocare un aumento della pendenza del tratto finale della pendice e, dunque, un aumento della produzione di sedimenti di quell'area.

Una tecnica che permette di interrompere la continuità del versante è la *coltivazione a strisce* o *strip cropping* che consiste nel coltivare, in strisce alternate, piante che proteggono il suolo dall'erosione (in genere foraggere ad elevata densità) e colture da reddito meno protettive. La distanza tra le coltivazioni è di 15-45 cm e la direzione di coltivazione è perpendicolare alla linea di pendenza del versante in modo che il terreno eroso nelle strisce occupate dalle colture da reddito viene intrappolato nelle fasce protettive. Tale forma di coltivazione è però poco diffusa in Italia a causa delle difficoltà di meccanizzazione delle operazioni colturali (***Bagarello e Ferro, 2006***).

Nelle opere che interrompono la continuità dei percorsi idrici lungo un versante sono comprese anche quelle *opere di sostegno* che, oltre a svolgere un controllo dell'erosione superficiale, esplicano un effetto di stabilizzazione del versante. Le opere utilizzate per tale scopo sono numerosissime: alcune prevedono l'impiego di materiale vegetale vivo in accoppiamento a legname o altro materiale (opere di ingegneria naturalistica), mentre altre utilizzano solo pietrame e/o legname per la realizzazione di veri e propri manufatti. Di quest'ultima categoria fanno parte i muretti a secco utilizzati anche nei terrazzamenti (***Fig. 6.9***).



Fig. 6.9 – Terrazzamento tipico della costiera amalfitana nel quale sono stati utilizzati i muretti a secco.

Le opere di ingegneria naturalistica utilizzabili nella Regione Campania sono riportate nel Decreto del Presidente della Giunta Regionale n° 574 del 22 luglio 2002 –“*Emanazione Regolamento per l’attuazione degli interventi di Ingegneria naturalistica.*” e sono utilizzate oltre che per la difesa del suolo anche per altri scopi, quali ad es. la rinaturalizzazione, la valorizzazione degli ambienti a fini turistici o il recupero ambientale di discariche e cave. A tali opere appartengono, tra le altre, anche le *fascinate vive*, le *vimate* e *palizzate vive* (fig. 6.10 e fig. 6.11), le *palificate vive*, le *gradonate vive*, le *grate vive* e i *materassi rinverditi*.

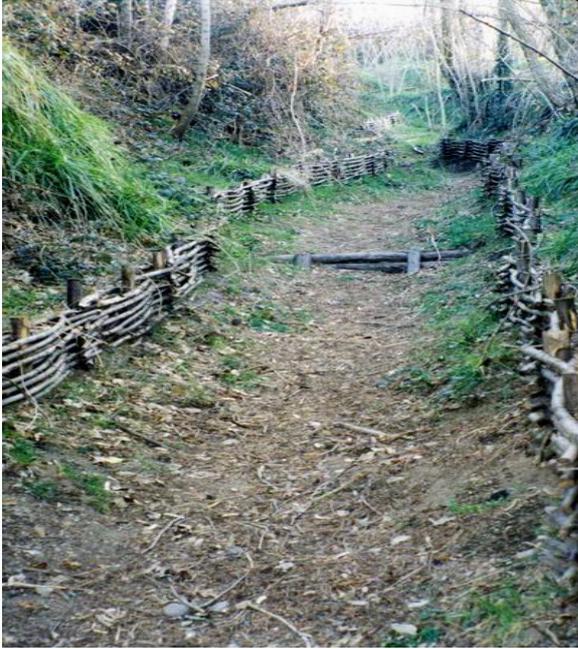


Fig. 6.10 – Esempio di viminata utilizzato negli interventi di sistemazione e messa in sicurezza del Monte Somma.



Fig. 6.11 – Esempio di palizzata utilizzata per la sistemazione del sentiero lungo i Cognoli sul Monte Vesuvio.

La *viminata* esplica un effetto di regimazione delle acque meteoriche. Tale sistema è stato largamente impiegato per il consolidamento di piccole frane mentre oggi è stato sostituito da sistemi stabilizzanti più efficaci e meno costosi.

La *palizzata*, esplica un effetto simile alla viminata ma prevede la formazione di gradoni lineari, sostenuti da strutture in legno, che corrono lungo le curve di livello del pendio e dove a monte si raccoglie il materiale terroso (APAT, 2002).

Par. 6.4 – Pratiche di conservazione del suolo: un esempio di applicazione

Gli ***interventi di conservazione del suolo*** - oltre a prevedere la costruzione di opere e/o manufatti per controllare l'erosione sui versanti di un bacino idrografico - comprendono anche le ***tecniche di gestione del suolo***.

Le pratiche di conservazione del suolo che mitigano il fenomeno erosivo, si dividono in:

- ***pratiche colturali***: utilizzano la vegetazione e la gestione del suolo per controllare il fenomeno erosivo. Esse mirano a realizzare un substrato idoneo allo sviluppo delle piante e ad incrementare la stabilità strutturale del mezzo poroso. In tal caso il controllo dell'erosione è operato dall'apparato aereo della vegetazione, dalla scabrezza della superficie, ecc.
- ***pratiche di supporto***: sono complementari a quelle colturali e comprendono le lavorazioni attuate lungo le curve di livello, la realizzazione di sistemi di drenaggio, i terrazzamenti e il ricorso a fasce di vegetazione. In tali pratiche sono comprese, inoltre, le scelte riguardanti il tipo di copertura vegetale da introdurre, le rotazioni colturali, le lavorazioni, le concimazioni e la gestione dei residui. Le pratiche di supporto, così come quelle colturali, sono applicate in maniera diffusa sull'area da "preservare".
- ***interventi strutturali***: sono realizzati solo in specifiche zone della superficie per contrastare fenomeni localizzati (es. approfondimento di un'incisione, erosione di una sponda di un corso d'acqua, ecc.)

Le aree su cui attuare gli interventi di conservazione sono ovviamente quelle caratterizzate da una maggiore vulnerabilità all'erosione.

La scelta della misura di conservazione del suolo da adottare deve essere effettuata tenendo conto delle indicazioni che emergono dall'analisi costi-benefici. In generale, è opportuno orientarsi verso misure di conservazione del suolo semplici ed economiche, che svolgano anche effetti rilevabili direttamente dall'agricoltore.

Le funzioni delle pratiche di conservazione del suolo sono molteplici; infatti oltre a ridurre l'erosione idrica proteggendo la superficie con la copertura vegetale, accresce l'attitudine del suolo a resistere agli sforzi tangenziali, favorisce i processi di infiltrazione dell'acqua e rallenta il *runoff* superficiale lungo la pendice (***Bagarello e Ferro, 2006***).

Nel caso del bacino del Tusciano, l'area a maggiore vulnerabilità all'erosione è risultata la zona collinare, dove la copertura vegetale è abbastanza diversificata (Fig. 6.12)

Come si evince dalla figura sotto riportata, nella sola zona collinare del bacino del Tusciano sono presenti ben 22 classi di uso del suolo (ricavate alla carta dell'uso agricolo del suolo, settore SIRCA della Regione Campania). Per una migliore "operabilità", dunque, è necessario ridurre le classi e focalizzare l'attenzione solo sulle zone su cui è possibile intervenire.

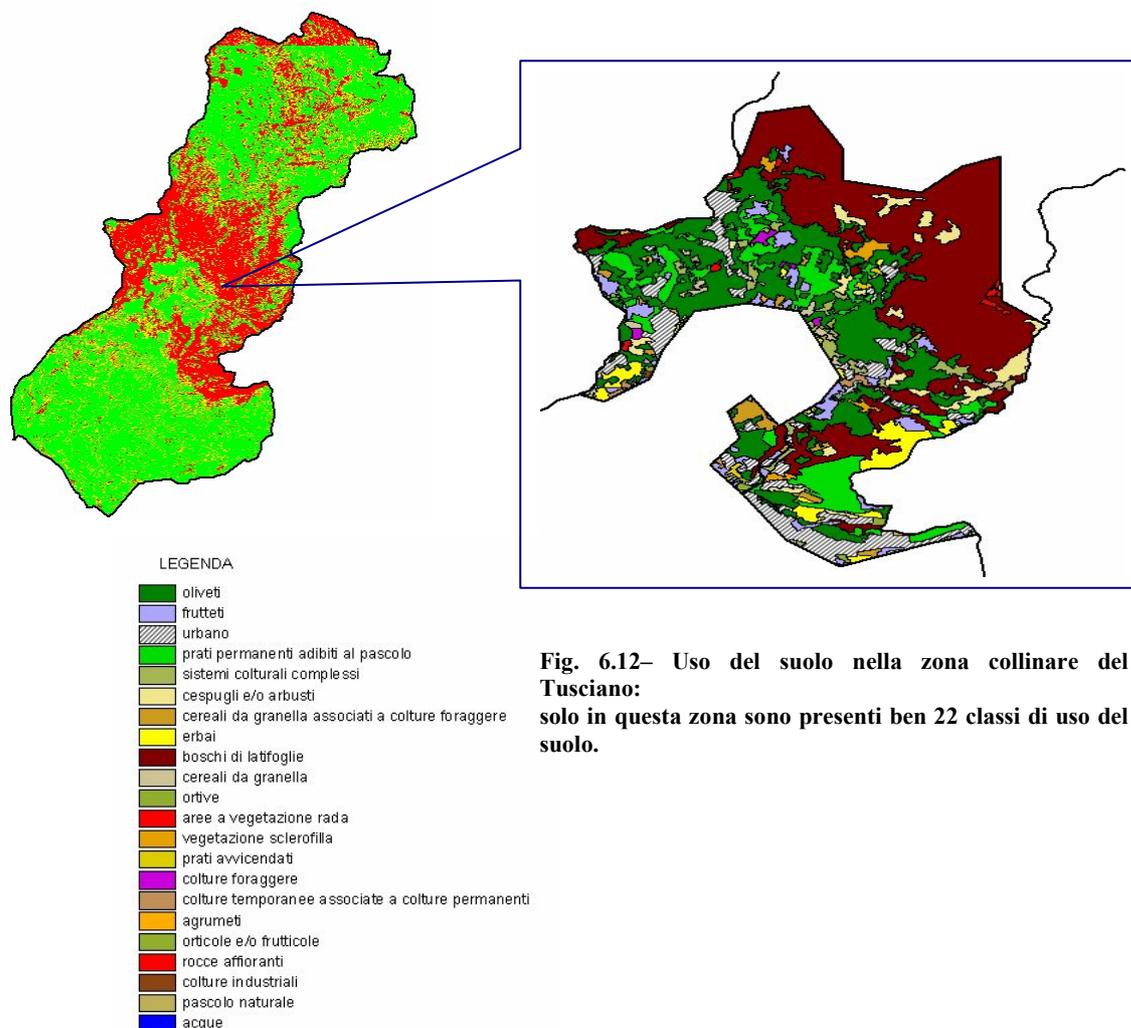


Fig. 6.12– Uso del suolo nella zona collinare del Tusciano: solo in questa zona sono presenti ben 22 classi di uso del suolo.

Si è ritenuto, pertanto, di considerare in via semplificativa le seguenti classi:

1. Superfici artificiali urbanizzate (tessuto urbano);
2. Superfici agricole utilizzate, che si distingueranno a loro volta in:
 - 2/1. Seminativi (cereali da granella, ortive, colture foraggere, cereali da granella associati a colture foraggere, orticole e/o frutticole, erbai, prati avvicendati);
 - 2/2. Colture permanenti (oliveti, frutteti, agrumeti);
 - 2/3. Zone agricole eterogenee (sistemi colturali e particellari complessi, colture temporanee associate a colture permanenti)

3. Territori boscati e ambienti semi-naturali, che si dividono in:

3/1. Zone boscate (boschi di latifoglie);

3/2. Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea (vegetazione sclerofilla, cespugli e/o arbusti, prati permanenti adibiti al pascolo);

3/3. Zone aperte con vegetazione rada o assente (aree a vegetazione rada, rocce e affioranti);

4. Corpi idrici (acque).

Alla luce di questa divisione in classi, la zona in esame sarà suddivisa come rappresentato i fig. 6.13:

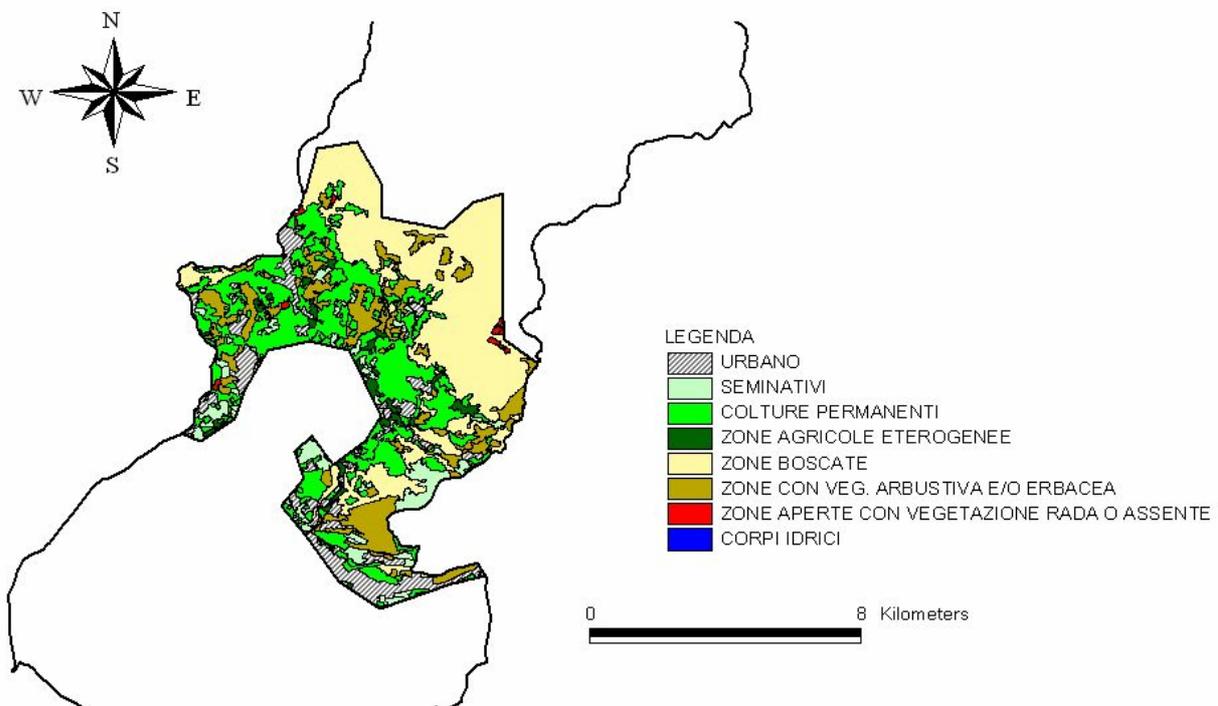


Fig. 6.13: Nuova classificazione dell'uso agricolo del suolo della zona collinare del bacino del Tusciano.

Considerando che sul tessuto urbano e sui corpi idrici non può essere effettuata alcuna modifica in quanto non concorrono all'erosione, sono sei le classi per le quali si possono attuare delle pratiche di conservazione del suolo.

Supponiamo di intervenire sulla classe seminativi e, a titolo di esempio, proponiamo una semplice tecnica di coltivazione, cioè di impiantare le colture lungo le curve di livello. Per tale pratica assumiamo un valore di P pari a 0,6 (*Bagarello e Ferro, 2006*). Lasciando inalterato il valore di P per la restante area, si può valutare la diminuzione della quantità media di suolo eroso.

Per la zona collinare, la quantità media di suolo eroso calcolato con la RUSLE, considerando per tutta la zona un fattore $P=1$, è pari a 155,06 ton/ha anno raggiungendo punte massime di 5458,61 t/ha anno.

licando la pratica agricola su citata e considerando solo per le aree coltivate a seminativi (Fig. 6.14) un fattore di $P=0,6$, si ottiene una diminuzione della quantità di suolo eroso a 151,80 t/ha anno.

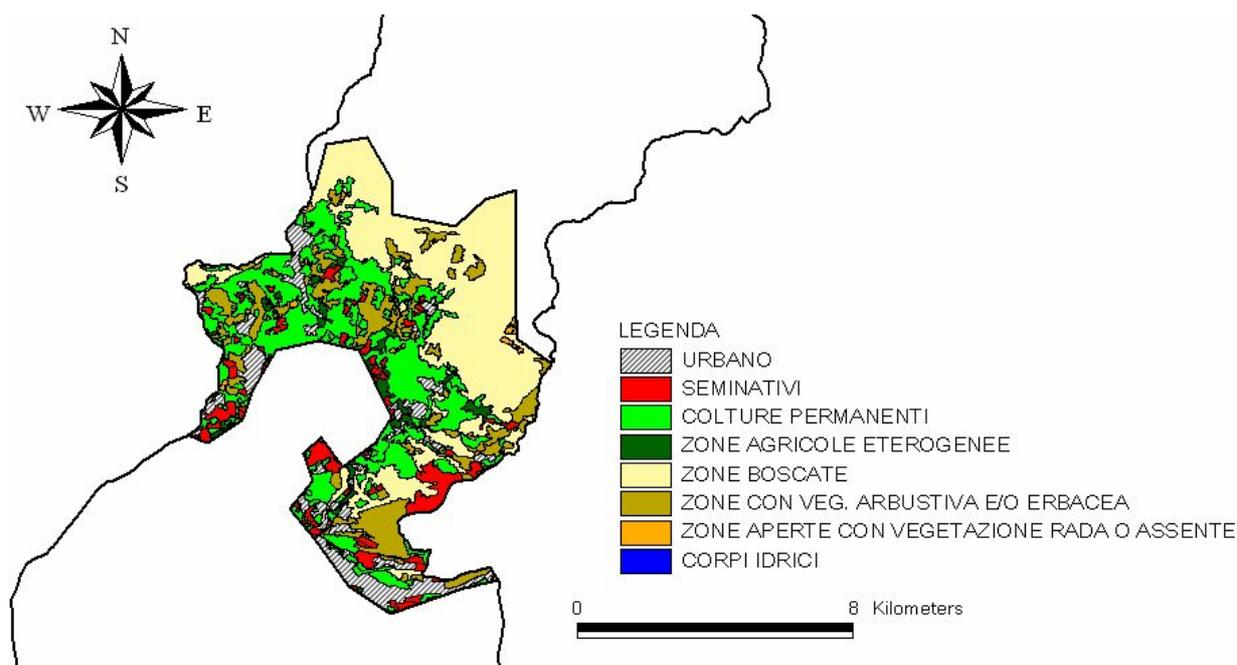


Fig. 6.14: Indicazione delle zone su cui è stata applicata una tecnica di conservazione del suolo. In rosso sono indicate le zone in cui il fattore $P = 0,6$.

Si ottiene, dunque, per la sola zona collinare, una diminuzione di 3,26 t/ha anno applicando una semplice tecnica di coltivazione che non comporta alcuna variazione di spesa per l'agricoltore.

Sebbene le zone aperte con vegetazione rada o assente occupino solo una piccola parte del territorio (cfr. zone rosse in fig. 6.13), un ulteriore miglioramento nella quantità di suolo eroso potrebbe essere sicuramente apportato dall'utilizzo di una delle tecniche di conservazione precedentemente illustrate, come ad es. un rivestimento vegetale. Tale tecnica di difesa del suolo, però, comporta degli oneri economici che debbono essere attentamente valutati.

Ulteriori miglioramenti potrebbero essere altresì apportati introducendo nella rotazione colturale le *colture foraggere*, le quali contrastano efficacemente il fenomeno erosivo, caratterizzandosi per un apparato aereo denso e prossimo alla superficie nonché per apparati

radicali molto sviluppati. L'inserimento di una foraggera inoltre, migliorerebbe anche le caratteristiche strutturali del suolo. L'uso delle leguminose, permette di realizzare una veloce copertura della superficie e un'azione miglioratrice riguardo alla qualità del suolo che può perdurare anche per un paio d'anni dopo la raccolta.

Nel caso degli *arboreti* (cioè vigneti, frutteti, oliveti e agrumeti), una modalità di protezione del suolo consiste nell'uso di *colture di copertura* (le cosiddette *cover crops*, **fig. 6.15**). Tali colture sono utilizzate, oltre per ridurre l'erosione anche per i seguenti motivi:

- aumento del contenuto di sostanza organica del suolo;
- contenimento della lisciviazione dell'azoto;
- miglioramento dell'attività biologica del terreno;
- miglioramento della struttura del terreno;
- miglioramento della ritenzione idrica;
- riduzione dei fenomeni di compattamento.

L'efficacia delle *cover crops* è tanto maggiore quanto più alta è la densità della piantagione e il grado di copertura della superficie.

Lo svantaggio di tale pratica risiede nel fatto che le colture di copertura competono per l'acqua e per i nutrienti con le colture principali, principalmente in estate. In tal caso, si può ricorrere a specie quali le leguminose annuali autorseminanti quali ad es. il *Trifolium spp.* e la *Medicago spp.* le quali, nel periodo estivo, vengono tagliate a fieno o esplicano la funzione di copertura come residui vegetali secchi (**Fagnano, 2006**).



Fig. 6.15: Uso delle cover crops in un arboreto
Fonte - <http://www.newfarm.org>

Un'altra pratica di conservazione, anch'essa molto diffusa, è la *pacciamatura* o *mulching* che consiste nella disposizione sulla superficie di materiale organico come paglia, foglie, rami, trucioli di legno, pezzi di corteccia (Fig. 6.16) o di natura minerale come ad esempio il pietrame (Fig. 6.17) che svolge un'azione antierosiva simile a quella svolta dalla vegetazione. In particolare questa pratica, rispetto alle altre, determina una riduzione dei fenomeni di sigillatura superficiale (*soil sealing*) e di erosione da impatto e, quindi, della produzione di deflusso e dell'erosione *inter-rill* e per solchi.



Fig. 6.16: Esempio di pacciamatura con materiale vegetale.
Fonte - <http://www.agri.marche.it/>



Fig. 6.17: Esempio di pacciamatura di un'aiuola effettuata con pietrame.
Fonte <http://www.armeni.it/>

Per esplicitare un'efficace azione antierosiva, il pacciame dovrebbe ricoprire almeno il 70-75% della superficie del suolo. Livelli più bassi infatti, non proteggerebbero adeguatamente il suolo mentre livelli maggiori potrebbero inibire la crescita regolare delle piante (*Giordani e Zanchi, 1995*).

Tra le pratiche di conservazione del suolo è importante citare anche le *lavorazioni secondo le curve di livello* o *contouring* (Fig. 6.18) che, determinando un aumento della scabrezza e della

capacità di accumulo superficiale, esplicano un'azione di controllo nei riguardi del fenomeno erosivo.



Fig. 6.18 – Esempio di lavorazione lungo le curva di livello
Fonte: www.epa.gov

Tale pratica può ridurre la perdita di suolo anche del 30-50% rispetto ad una determinata parcella in dipendenza di fattori quali la pendenza, la capacità erosiva dell'acqua, ecc. Secondo **Wischmeier e Smith (1978)**, l'efficacia del *contouring* è massima per pendenze comprese tra il 3-8 % mentre secondo **Rendard et al. (1997)** tale pratica è efficace con pendenze fino al 20%.

Per il controllo dell'erosione nelle *aree adibite a pascolo*, è necessario assicurare una copertura del suolo nei periodi in cui esso è maggiormente esposto all'azione dell'agente erosivo. Ciò può essere realizzato o con una limitazione nell'utilizzazione dell'erba oppure rinnovando la copertura vegetale in modo da determinare un aumento della scabrezza superficiale che favorirà l'infiltrazione a scapito dell'erosione (**Bagarello e Ferro, 2006**).

Infine, nelle *aree boschive*, dove generalmente il fenomeno erosivo è più limitato, si può verificare una perdita di suolo nelle aree in cui è presente un pascolo intensivo o quando viene effettuata la pratica di taglio del legname. In quest'ultimo caso è necessario garantire la copertura del suolo tra il taglio e la reintroduzione della copertura vegetale. Nei climi umidi la vegetazione spontanea si sviluppa rapidamente e riesce ad assicurare un'adeguata protezione dall'erosione anche in tempi brevi.

Un'altra causa di esposizione diretta del suolo all'azione dell'agente erosivo è la realizzazione di strade o gli incendi. In tali casi è necessario proteggere adeguatamente le superfici ricorrendo, ad esempio, ad una pacciamatura.

CAPITOLO 7

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il modello RUSLE è universalmente riconosciuto come un metodo valido per il calcolo del suolo perso per erosione da un bacino idrografico ed è stato anche validato in svariate zone con dati sperimentali.

L'applicazione di tale modello al bacino del Tusciano ha permesso di redigerne la mappa di erodibilità, evidenziando le zone più suscettibili al fenomeno erosivo e fornendo anche una stima di massima della quantità di suolo eroso.

L'applicazione del modello per la redazione della carta di erodibilità del territorio si basa sui seguenti fattori: erodibilità della pioggia (R), erosività del suolo (K), fattore topografico (LS), copertura vegetale (C) e pratiche di conservazione (P).

Dal calcolo dell'*erosività della pioggia* effettuato per il bacino del Tusciano è emerso un elevato valore di R ($2534 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) corrispondente ad una forte erosività della pioggia, con valori medi annui di precipitazione che si attestano sui 1450 mm circa. I valori più alti sono stati riscontrati per la zona montana, mentre i più bassi per la zona valliva del bacino. Tale fattore è stato uno tra i pochi valutato sulla base di dati sperimentali, in quanto sono stati utilizzati i dati relativi alla quantità di pioggia media annua, mensile e giornaliera per cinque stazioni pluviometriche situate all'interno del bacino o nelle immediate vicinanze.

Anche il *fattore topografico* è stato valutato in modo abbastanza preciso, in quanto ricavato tramite strumenti GIS utilizzando il metodo proposto da *Van Remortel et al. (2001)*. Il metodo proposto dall'autore prevede l'impiego di un programma sviluppato in linguaggio AML (acronimo di Arc Macro Language) che utilizza i moduli Arc e Grid della ArcInfoTM Workstation versione 8.2 (prodotto dalla ESRI) che permette il calcolo del fattore topografico a partire dal modello digitale del terreno relativo al bacino avente una risoluzione al suolo di 20 m. Anche il peso di tale fattore, se confrontato con altri dati di letteratura, è risultato abbastanza elevato (pari a 6,26) particolarmente nella zona montana del bacino, cosa prevedibile poiché tale variabilità riflette la variabilità altimetrica, infatti si passa da una zona montana (in cui si raggiungono i 1788 m s.l.m.), ricca di versanti, ad una zona pianeggiante situata praticamente al livello del mare.

La stima del fattore di *erodibilità del suolo*, ha risentito della mancanza di dati sperimentali in quanto, per la sua valutazione, sarebbe stato necessario conoscere i dati relativi alla tessitura del suolo e alla quantità di sostanza organica. I dati sperimentali relativi alla sola parte valliva sono stati utilizzati per effettuare un'extrapolazione dei dati per tutto il bacino. Ciò ha comportato una certa approssimazione nella stima del valore di K. Considerando, però, che il fenomeno erosivo interessa i primi cm di suolo e, dalla carta delle coperture piroclastiche relativa al bacino del Tusciano è emersa una copertura dell'area variabile da pochi cm a svariati metri, l'approssimazione effettuata è da ritenersi trascurabile. Il valore medio di erodibilità del suolo è risultato anche in questo caso abbastanza elevato (**0,0418 Mg ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹**) se confrontato con i valori riportati in letteratura relativi ai suoli di diverse zone del mondo.

La stima del fattore C, cioè di *copertura vegetale*, è stata effettuata utilizzando gli indici vegetazionali normalizzati ricavati dalle immagini da satellite della zona. Tale stima ha comportato una certa approssimazione relativa alla parte alta del bacino, in quanto le immagini da satellite, ricavate per il periodo estivo dal satellite LANDSAT 5 (immagine del 26 giugno 2001) e per il periodo invernale dal LANDSAT 7 (immagine del 25 novembre 2001), mancavano di dati relativi alla suddetta zona. Tuttavia la scarsa variabilità della copertura del suolo ricavata dalla lettura della carta dell'uso agricolo del suolo, ha consentito l'extrapolazione dei dati, e la stima del fattore C per tutto il bacino. Considerato che più della metà del territorio è occupata da boschi di latifoglie, che esplicano un'efficace copertura del suolo, per la parte montana il valore medio di C è risultato abbastanza basso, mentre nella zona collinare e valliva del bacino c'è una maggiore diversificazione nell'uso del suolo e dunque della copertura vegetale.

L'ultimo fattore, relativo alle *pratiche di conservazione del suolo o antierosive* (P), è stato posto uguale ad 1 per tutto il bacino, in quanto, dai sopralluoghi effettuati, non è stata riscontrata l'adozione di particolari pratiche antierosive.

La determinazione della quantità media di suolo eroso ottenuta (pari a 57 t/ha anno), attese le approssimazioni imposte dalla carenza di dati e l'assoluta mancanza di dati sperimentali di stazioni torbidometriche lungo la rete idrografica, deve essere considerata una stima approssimativa della quantità di suolo perso per erosione dal bacino del Tusciano, da considerarsi comunque valida come ordine di grandezza.

La disponibilità di dati sperimentali inoltre, risulterebbe molto utile per il calcolo del *Sediment Delivery Ratio (SDR)*, ossia del rapporto tra la quantità di suolo perso dal bacino per erosione

(denominata *gross erosion*) e la quantità che effettivamente raggiunge la sezione di chiusura del bacino (denominata *net erosion*) che influenza l'eventuale inquinamento dei corpi recettori. Infatti, i sedimenti fini trasportati nella corrente superficiale che giunge al corpo recettore, possono trasportare, adesi sulla superficie, le sostanze chimiche usate in agricoltura e provocare così un inquinamento della risorsa idrica.

I dati delle stazioni torbidometriche sarebbero inoltre utili anche per confermare la stima della “*net erosion*” del bacino del Tusciano calcolata in tale lavoro con l'analisi geomorfica quantitativa (*Ciccacci et al., 1980*) e ricavati da dati di letteratura con il metodo di Gavrilovic (*Luciano, 2003*).

Potendo effettuare il confronto con dati sperimentali, sarebbe possibile anche valutare l'attendibilità di un metodo rispetto all'altro. Anche per questi metodi infatti, è necessario un confronto con un dato numerico per giudicare l'attendibilità dei risultati ottenuti.

Da considerarsi di grande interesse è infine, la *mappa dell'erodibilità* del bacino, che ha consentito di individuare le aree caratterizzate dalla maggiore vulnerabilità all'erosione che, nel caso del Tusciano, è risultata la zona collinare.

Dalla mappa dell'erodibilità è possibile trarre indicazioni per la pianificazione di eventuali azioni di mitigazione dei fenomeni erosivi. Ovviamente il ricorso a tecniche di mitigazione del rischio erosivo dovrà essere basato su una “*valutazione numerica*” preliminare dell'erosione del territorio, in modo da valutare attendibilmente la gravità del caso e scegliere l'intervento più adatto. Tale valutazione può essere effettuata anche utilizzando la RUSLE ma ricavando i fattori in base a dati sperimentali.

L'applicazione di pratiche agronomiche semplici può tuttavia essere adottata anche se il valore dell'erosione non è elevato, in quanto consentirebbe comunque di ridurre il potenziale rischio di erosione della zona.

A titolo di esempio, in tale lavoro è stato valutato l'effetto di una semplice pratica agronomica sul valore medio di suolo eroso dalla zona a maggiore vulnerabilità all'erosione. La pratica agronomica considerata, relativamente all'uso del suolo corrispondente a “*seminativo*”, è stata quella di impiantare le colture lungo le curve di livello in modo da ostacolare il flusso superficiale. Per tale pratica agronomica è stato assunto un valore di P pari a 0,6 (*Bagarello e Ferro, 2006*) ed è stata valutata in termini numerici la differenza nella quantità di suolo eroso relativa alla sola zona collinare. L'applicazione di questa semplice pratica agronomica ha

comportato una diminuzione della quantità di suolo eroso dalla zona collinare pari a 3,26 t/ha anno.

La presenza di *colture permanenti* (olivi, vigneti, frutteti e agrumeti) e di *zone boscate naturali* limita notevolmente gli interventi che possono essere attuati sul territorio sia nella parte alta della zona collinare e sia nella zona montana che sono proprio le zone in cui l'erosione è più accentuata.

In tali zone è opportuno, nei periodi di maggiore esposizione del suolo all'agente erosivo (ad es. periodo del taglio degli alberi), proteggerne la superficie o ricorrendo alle cover crops oppure utilizzando i pacciami che comunque esplicano un'azione antierosiva.

Valutando in estrema sintesi i risultati del lavoro sviluppato può in conclusione osservarsi quanto segue:

- i risultati costituiscono una stima di massima del valore della quantità di suolo perso per erosione nel bacino del Tusciano;
- la mappa dell'erodibilità messa a punto consente un'attendibile individuazione delle aree del bacino a maggior rischio di erosione.
- se integrata con ulteriori dati sperimentali, allo stato attuale non disponibili, l'applicazione della RUSLE potrebbe fornire indicazioni più precise sulla quantità di suolo perso per erosione dalla superficie del bacino;
- in particolare appare necessaria l'effettuazione di misure torbidometriche nella rete idrografica del Tusciano. In tal modo sarebbe possibile una valutazione della quantità di suolo che effettivamente giunge alla sezione di chiusura;
- mediante valutazioni preliminari è stato possibile mettere in evidenza l'efficacia di interventi di mitigazione dell'erosione, anche se limitati all'utilizzo di una semplice pratica agricola .

RINGRAZIAMENTI

*Alla fine di questo lavoro vorrei esprimere la mia gratitudine ai due relatori, il **Prof. Maurizio Giugni** e la **Prof. Daniela Ducci**, per il tempo che mi hanno dedicato e per il loro supporto materiale e morale che mi ha sempre accompagnato durante questi anni.*

*Ringrazio il **prof. Francesco Sdao** per i preziosi consigli forniti e per la disponibilità mostrata alla revisione della tesi.*

*È doveroso ringraziare il **P.O.Di.S.**, Progetto Operativo Difesa Suolo, Unità di Supporto Locale n.6 – Regioni Ob. 1 (PON-ATAS 2000-2006) – Direzione Generale Difesa del Suolo – Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio, in particolare il **dott. Carlo Terranova** e la **dott.ssa Elena Piscitelli** che con estrema cortesia e disponibilità hanno fornito un contributo fondamentale nella realizzazione di questo lavoro.*

*Un ringraziamento va anche all’**Autorità di Bacino in Destra Sele**, in particolare al Segretario, **avv. Stefano Sorvino**, al **dott. Gerardo Lombardi**, all’**ing. Luigi Fariello** e al **dott. Sergio Iannella** che sono stati sempre pronti ad accontentare ogni richiesta di dati utilizzati nel corso del lavoro.*

*Un ringraziamento speciale va al **dott. Filippo Onori** del Centro Ricerche ENEA di Portici per la competenza messa generosamente a disposizione e, soprattutto, per il prezioso aiuto fornito nell’interpretazione dei risultati.*

*La mia gratitudine va anche alla **dott.ssa Grazia Fattoruso** del Centro Ricerche ENEA di Portici il cui contributo è stato determinante nell’analisi geomorfica quantitativa con gli applicativi G.I.S. da lei sviluppati.*

*Un ringraziamento particolare va al coordinatore del corso, il **Prof. Lucio Lirer**, per il costante incoraggiamento e per la paziente assistenza nei tre anni di corso.*

*Un grazie immenso va alla collega **Ing. Francesca De Luca Tupputi Schinosa** per i suggerimenti forniti e la disponibilità gratuita che ha reso più piacevoli i momenti trascorsi presso il Dipartimento di Geologia Applicata.*

BIBLIOGRAFIA**A**

- * Amore E., Modica C., Nearing M.A., Santoro V.C. (2004) – “*Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins*”, Journal of Hydrology, 293, pp. 100-114
- * Angelucci A., Bernardini F. & Cercato M. (1969) – “*Idrogeologia dell’Alto bacino del Liri (Appennino Centrale)*”, Geol. Rom., VIII, pp. 393-412
- * Angima S.D., Stott D.E., O’Neill M.K., Ong C.K., Weesies G.A. (2003) – “*Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions*”, Agriculture, Ecosystems and Environment, 97, pp. 295-308
- * APAT (2002) – “*Atlante delle opere di sistemazione dei versanti*”, Manuali e linee guida 10/2002, Dipartimento difesa del suolo.
- * Arnoldus H.M.J. (1977) – “*Methodology used to determinate the maximum potential average soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco*”. Assessing Soil Degradation. FAO Soil Bulletin, n. 34, p. 8-9
- * Arnoldus H.M.J. (1980) – “*An approximation to the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation*” in: De Boodt, Gabriels (Eds) Assessment of erosion, Wiley, New York
- * Arsenio G., Coticchia A., Donatelli D., Maseroli R., Pierozzi M. (2002) – “*Il nuovo metodo dell’IGM per il passaggio fra sistemi di riferimento ed il software Vertol*”, Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA, Perugia, 5-8 Novembre 2002, vol. 1, pag. 189-194.
- * Avena G.C., Giuliano G., Lupia Palmieri E. (1967) – “*Sulla valutazione quantitativa della gerarchizzazione ed evoluzione dei reticoli fluviali*”, Boll. Soc. Geol. It., 86, pp. 781-796
- * Avena G.C. & Lupia Palmieri (1969) – “*Idrogeologia dell’Alto bacino del Liri (Appennino Centrale)*”, Geol. Rom., VIII, pp. 319-378

B

- * Bagarello V., Ferro V., Giordano G. (1991) – “*Contributo alla valutazione del fattore di deflusso di Williams e del coefficiente di resa solida per alcuni bacini idrografici siciliani*”, Rivista di Ingegneria Agraria, n. 4, pp. 238-251

- * Bagarello V., Ferro V. (2006) – *“Erosione e conservazione del suolo”*, McGraw Hill Ed., 6311-4
- * Baginska B., Milne-Home W., Cornish P.S. (2003) – *“Modelling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST”*, Environmental Modelling & Software, n. 18, pp. 801-808
- * Balacco G. (2003) – *“Modelli interpretativi del processo erosivo nei bacini idrografici”* – Tesi di dottorato in Ingegneria Idraulica ed Ambientale (XVI Ciclo), Università degli Studi di Napoli “Federico II”
- * Bazzoffi P. (1984) – *“Erosione sui versanti e conseguente sedimentazione in piccoli serbatoi artificiali. Nota III: Validazione di alcuni modelli di previsione dell'erosione (USLE, GAVRILOVIC, PSIAC) per mezzo del confronto fra i valori stimati e quelli effettivamente misurati attraverso la sedimentazione negli invasi”*. Annali Istituto Sperimentale per lo Studio e la Difesa del Suolo, vol. XV, pp. 149-188.
- * Bazzoffi P. (1985) – *“Methods for net erosion measurement in watershed as a tool for the validation of models in central Italy”* – Workshop on soil erosion and hillslope hydrology with emphasis on higher magnitude events, Leuven
- * Becchi I., Billi P. & Tacconi P. (1979) – *“Trasporto solido e parametri fisici di un bacino idrografico. Prime relazioni osservate nei bacini sperimentali dei TT. Virginio e Pesciola.”*, Mem. Soc. Geol. It., XIX, pp. 275-279
- * Bell F.G. (2001) – *“Geologia Ambientale”* teoria e pratica, Zanichelli Ed.
- * Beyer Portner N., (1998) – *“Erosion des bassins versant alpins suisses par ruissellement de surface” PhD Thesis, Laboratoire de Constructions Hydrauliques – LCH, n. 1815, Lausanne, Switzerland.*
- * Bhuyan S.J., Koelliker J.K., Marzen L.J., Harrington J.A., jr. (2003) – *“An integrated approach for water quality assessment of a Kansas watershed”*, Environmental Modelling & Software, n. 18, pp. 473-484
- * Boellstorff D., Benito G. (2005) – *“Impacts of set-aside policy on the risk of soil erosion in central Spain”*, Agriculture, Ecosystems and Environment, 107, pp. 231-243
- * Budetta P., Corniello A., De Riso R., Santo A. (1994) – *“Geologia ed idrogeologia del settore della Piana del Sele compreso tra i fiumi Tusciano e Sele”*, Geologica Romana, 30, pp. 87-96

* Buretta P., Celico P., Corniello A., de Riso R., Ducci D., Nicotera P. (1988) – “*Carta idrogeologica del foglio 186 (S. Angelo dei Lombardi) e relativa memoria illustrativa*”, Mem. Soc. Geol. It., 41, pp. 1029-1038, Roma

C

* Caiaffa E. (2006) – “*Sistemi Informativi GEOgrafici*” – Corso di formazione a distanza reperibile sul sito: <http://odl.casaccia.enea.it/FADIIIGen/FadIIISite/index.htm>

* Caporali F. (1985) – “*Gli effetti della gestione agroforestale sul flusso di acqua e di elementi minerali*” Atti S.I.T.E., 5, Tomo 1°, Ed. Zara, Padova

* Caprioli M. (2006) – “*GIS*” e “*CARTOGRAFIA*”, Dispense del corso di Cartografia Numerica – Corso di Laurea in Ingegneria Ambientale e del Territorio N.O., Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Bari

* Carlucci R. (2006) – “*Sistemi Informativi Geografici – Introduzione e note preliminari*”, Dispense del corso di “Elementi di topografia”, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Roma Tre.

* Celico P. B., De Vita P., Monacelli G., Scalise A. R. & Tranfaglia G. (2004) – “*Carta Idrogeologica dell'Italia Meridionale*”, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.

* Celico P., Guadagno F.M., Luise G., Tescione M. & Vallario A. (1987) – “*Idrogeologia del Monte Polveracchio – Monte Raione (Monti Picentini, Campania)*”, Mem. Soc. Geol. It., n. 37, pp. 341-362

* Ceriali A. (2002) – “*Telerilevamento delle dinamiche di barena*”, Tesi di laurea in Scienze Ambientali, Università degli Studi di Venezia “Cà Foscari”

* Chisci G., D'Egidio G. & Sfalanga M. (1977) – “*Misure del trasporto solido in alcune ricerche agro-idrologiche*”, Atti Conv. “Misura del trasporto solido al fondo nei corsi d'acqua”, C.N.R. Firenze, B 2.1 – B 2.25

* Chisci G. , Zanchi C. (1994) – “*Aspetti agronomici della conservazione dei suoli in pendio: coperture vegetali e sistemi colturali*”, Rivista di Agronomia, 28(4), pp. 297-319

* Ciccacci S., Fredi P., Lupia Palmieri E. (1977) – “*Rapporti fra trasporto solido e parametri climatici e geomorfici in alcuni bacini idrografici italiani*”. Atti del Conv. "Misura del trasporto solido al fondo nei corsi d'acqua: problemi per una modellistica matematica (C.N.R.)", 13-14 ottobre 1977, Firenze

- * Ciccacci S., Fredi P., Lupia Palmieri E. (1980) – “Contributo dell’analisi geomorfica quantitativa alla valutazione dell’entità dell’erosione nei bacini fluviali” Boll. Soc. Geol. It., 99, pp. 455-516
- * Ciccacci S., D’Alessandro L. & Fredi P. (1983) – “Sulla valutazione indiretta dell’interrimento nei bacini lacustri: il lago artificiale di Scandarello (Rieti)”, Atti XXIII Congr. Geogr. It., 2 (3), pp. 37-52
- * Ciccacci S., De Rita D., Fredi P. (1988) - “Geomorfologia quantitativa e morfoneotettonica dell’area di Morlupo - Castelnuovo di Porto nei Monti Sabatini (Lazio)”, Geogr. Fis. e Dinam. Quat., Suppl. I, pp. 197-206
- * Ciet P. & Tazioli G.S. (1978) – “Sul trasporto torbido del T. La Canala (Basilicata)”, Geol. Appl. e Idrogeol., XIII, pp. 141-157
- * Corniello A., Di Gennaro A., Ducci D. (2005) – “Caratteristiche idrogeologiche del territorio, vulnerabilità all’inquinamento degli acquiferi e valutazioni conclusive” in: Convenzione tra Dip. Di Ingegneria Geotecnica dell’Università degli Studi di Napoli “FEDERICO II” e l’Azienda Speciale Agrisviluppo (C.C.I.A.A. di Caserta)
- * Cremaschi M., Rodolfi G. (1991) – “Il suolo – Pedologia nelle scienze della terra e nella valutazione del territorio” Nuova Italia Scientifica (NSI) – Roma

D

- * D’Antonio A., Ingenito M.R. (2003) - “La carta dell’utilizzazione agricola dei suoli in Campania”, Campania Agricoltura, n. 10
- * D’Asaro F., Santoro M. (1983) – “Aggressività della pioggia nello studio dell’erosione idrica nel territorio siciliano”, Università degli Studi di Palermo, Pubbl. N.164
- * De Bonis, P., Fattoruso, G., Grauso, S., Peloso, A. & Regina, P. (2002) - “Computation of Geomorphic Parameters via GIS-based Algorithms: a Support Tool in River Basin Management”. - In: New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life: Eco-compatible Solutions for Aquatic Environments (ed. da G. Becciu, U. Maione, B. Maione Letho, R. Monti, A. Paoletti, M. Paoletti & U. Sanfilippo) (Atti della Conferenza di Capri, 24-28 giugno 2002), pp. 136-137, CSDU, Milano.
- * De Jong S.M. (1994) – “Applications of reflective remote sensing for land degradation studies in a mediterranean environment”. Nederlandse Geografische Studies (NGS) 177

- * De Rosa P. (2003) – *“Analisi e confronti di modelli di erosione del suolo e trasporto di sedimenti tramite l’uso di sistemi G.I.S.”* – Tesi di laurea in Ingegneria per l’Ambiente e il Territorio, Università degli Studi di Perugia.
- * de Santos Loureiro N., de Azevedo Coutinho M. (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, n. 250, pp. 12-18
- * Detar W.R., Ross J.J., Cunningham R.L. (1980) – *“Estimating the C factor in Universal Soil Loss Equation for landscaped slopes”*, Journal of Soil and Water Conservation, n. 35(1), pp. 40-41
- * De Vente J., Poesen J. (2005) – *“Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models”*, Earth Science Reviews, Vol. 71, 1-2, pp. 95-125
- * Di Maggio (2004) – *“Rischio geologico a_1”*, Dispense del master in Ingegneria dell’emergenza, Regione Sicilia. (<http://www.regione.sicilia.it>)
- * Di Nocera S., Matano F., Pescatore T.S., Pinto F., Quarantiello R., Senatore M.R. & Torre M. (2006) – *“Schema geologico del transetto Monti Picentini orientali-Monti della Daunia meridionali: unità stratigrafiche ed evoluzione tettonica del settore esterno dell’Appennino meridionale”*, Boll. Soc. Geol. It., n. 125, pp. 39-58
- * Diodato N. (2004) – *“Estimating RUSLE’s rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime”*, Hydrology and Earth Sciences, 8(1), pp. 103-107
- * Dissmeyer, G. E. and G. R. Foster (1981) – *“Estimating the cover management factor (C) in the universal soil loss equation for forest conditions”*, Journal of Water and Soil Conservation, 36, 235-240
- * Ducci D. (1999) – *“The spatial variability of climatic data in the Hydrogeologic budgets”*, Proceedings of International Conference on “ModelCARE 1999”, II, pp. 673 - 678

E

- * El Swaify S.A., Dangler E.W. (1976) – *“Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hydrologic parameters”* In: Foster G.R., “Soil Erosion Prediction Control” Soil and water conservation Society, Ankeny, IA, USA, pp. 105-114

* ESRI (1996) – “*Arcview GIS – The Geographic Information System for everyone*”, Environmental Systems Research Institute, Inc., USA , pp. 363

F

* Fagnano M. (2005) – “*Ruoli della vegetazione per la qualità dell’ambiente*”, Dispense del corso tenutosi al Centro Interdipartimentale Ricerca Ambiente (C.I.R.A.M.) dell’Università degli Studi di Napoli “Federico II”, Settembre – Ottobre 2005

* Fanizzi L., Misceo S. (2003) – “*Gli effetti delle sistemazioni agroforestali sul deflusso idrico e trasporto solido nei bacini idrografici*”, Scienza e Inquinamento. L’ambiente, 3/03, pp. 12-15

* Fattoruso, G. (2005) – “*Removing inconsistencies in vector river networks extracted from cartography*”, GEOInformatics : Magazine for Surveying, Mapping and GIS Professionals, Emmeloord n. 8, pp. 48-49

* Ferretti P., Moratti L., Pellegrini M. & Zarotti L. (1979) – “*Il bacino sperimentale del Rio delle Viole (Appennino Emiliano). Primi risultati.*”, Mem. Soc. Geol. It., XIX, pp. 269-274

* Flanagan D.C., Nearing M.A. (1995) – “*USDA – Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation*”, National Soil Erosion Research Lab (NSERL) Rep. 10, USDA-ARS.

* Fontana M., Venturi A. (1999) – “*Le tecniche di conduzione*”, Agricoltura, n. 27(3), pp. 36-43

* Fournier F. (1960) – “*Debit solide des cours d’eau. Essai d’estimation de la perte en terre subie par l’ensemble du globe terrestre*”, Inter. Assoc. Sci. Hydrol., 53, pp. 19-22

* Francese P.P., Melchiorre R., Scopa A. (2005) – “*Erosione del suolo: l’applicazione del modello USLE al territorio della Regione Basilicata*”, Biologi Italiani, n.5, pp. 61-65

* Fu G., Chen S., McCool D.K. (2006) - “*Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS*”, Soil and Tillage Research, 85, pp. 38-49

G

* Gazzolo T., Bassi G. (1961) – “*Contributo allo studio del grado di erodibilità dei terreni costituenti i bacini montani dei corsi d’acqua italiani*”, XII Assemblea Generale dell’unione geodetica e geofisica Internazionale, Helsinki (1960), pp. 9-19

* Gazzolo T., Bassi G. (1964) – “*Le transport solide en suspension dans les bassins versants des cours d’eau italiens*”, Assemblée Générale de Berkeley de l’Uggi – Pubbl. N. 65, pp.203-230

* Giordani C., Zanchi C. (1995) – “*Elementi di conservazione del suolo*” citato in Bagarello e Ferro, 2006

* Giugni M., Celico P., Fontana N., Lombardi G. (2002) - “*A proposed methodology for drawing up water protection plans*”, Atti di 2nd International Conference New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life: Ecompatible Solution for Aquatic Environments, Capri, 24-28 giugno 2002.

H

* Hickey R., Smith A., and Jankowski P. (1994) – “*Slope Length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID*”, Computer, Environment and Urban System, 18, pp. 365-380

* Horton R.E. (1945) – “*Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*”, Geol. Soc. Amer. Bull., 56, pp. 275-370

* Hoyos N. (2005) – “*Spatial modelling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes*”, Catena, 63, pp.85-108

* Hudson N.W. (1981) – “*Soil Conservation*”, BT Batsford, London

I

* Iaquinta P., Terranova O. (2004) – “*Scenario di rischio di erosione idrica*”, Rivista MondoGIS n. 43, pp. 17-20

J

* Julien P.Y., Simons D.B. (1985) – “*Sediment transport capacity of overland flow*”, trans. ASAE, 28(3), pp. 755-762

L

* Lee S. (2004) – “*Soil erosion assessment and its verification using the Universal Soil Loss Equation and Geographic Information System: a case study at Boun, Korea*”, Environmental Geology, 45, pp. 457-465

- * Leòn L.F., Lam D.C., Swayne D.A., Farquhar G.J., Soulis E.D. (2000) – “*Integration of non-point source pollution model with a decision support system*”, Environmental Modelling & Software, n. 15, pp. 249-255
- * Lo A., El-Swaify S.A., Dangler E.W. and Shinshiro L. (1985) – “*Effectiveness of EI30 as an erosivity index in Hawaii*”. In: Soil Erosion and conservation S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer and Lo A. (eds) Soil Conservation Society of America, Ankeny, pp. 384-392
- * Luciano C. (2003) – “*Calcolo dell’apporto solido fluviale nel bacino del Tusciano*”, Tesi di Laurea in Scienze Ambientali, Università degli Studi di Napoli “Parthenope”, a.a. 2002-2003
- * Lupia Palmieri E. (1983) – “*Il problema della valutazione dell’entità dell’erosione nei bacini fluviali*”, Atti XXIII Congr. Geogr. It., 2 (1), pp. 143 – 176
- * Lupia Palmieri E., Ciccacci S., Civitelli G., Corda L., D’Alessandro L., Del Monte M., Fredi P., Pugliese F. (1995) – “*Geomorfologia quantitativa e Morfodinamica del territorio abruzzese. I - Il bacino idrografico del Fiume Sinello*”. Geogr. Fis. e Din. Quat., n. 18, pp. 31-46
- * Lupia Palmieri E., Centamore E., Ciccacci S., D’Alessandro L., Del Monte M, Fredi P & Pugliese F. (1998) – “*Geomorfologia quantitativa e morfodinamica del territorio abruzzese: II - Il bacino idrografico del Fiume Tordino*”. Geogr. Fis. e Din. Quat., n. 21, pp. 113-129

M

- * Manrique L.A. (1988) – “*LEAM – Land Erodibility Assessment Methodology*” – Editorial and Publication Shop, Honolulu, HI, pp. 28
- * Merritt W.S., Letcher R.A., Jakeman A.J. (2003) – “*A review of erosion and sediment transport models*”, Environmental Modelling & Software, n. 18, pp. 761-799
- * Millward A.A., Mersey J.E. (1999) – “*Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed*”, Catena, 38, pp. 109-129
- * Molino B., Savastano V. (2005) – “*Approccio distribuito per la stima dell’erosione idrica superficiale di un bacino idrografico*”, in “Il Piano Stralcio per la Difesa dal Rischio Idrogeologico”, Quaderno n. 1, Autorità di Bacino della Basilicata.
- * Moore I.D., Burch G.J. (1986) – “*Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory*”, Water Resources Research, v. 22, p.1350-1360.

* Motroni A., Canu S., Bianco G., Loj G. (2004) – “*Carta delle aree sensibili alla desertificazione – Scala 1:100000*”, Relazione Tecnica Servizio Agrometeorologico Regionale per la Sardegna, pag. 23

O

* Obi M.E., Salako F.K. (1995) – “*Rainfall parameters influencing erosivity in Southeastern Nigeria*”, Catena, 24, pp. 275-287

* Onori F., De Bonis P., Grauso S. (2006) – “*Soil erosion prediction at the basin scale using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a catchment of Sicily (Southern Italy)*”, Environmental Geology DOI 10.1007/s00254-006-0286-1, 12 pp

P

* Persicani D. (1989) – “*Elementi di scienza del suolo – dalla pedogenesi alle correlazioni ambientali*”, Milano, Casa Ed. Ambrosiana, pp.478

* Pimentel, D. , C. Harvey, P. Resosudarmo, K. Sinclair, D. Kurz, M. McNair, S. Crist, L. Shpritz, L. Fitton, R. Saffouri, R. Blair. (1995) – “*Environmental and economic cost of soil erosion and conservation benefits*”, Science, n. 267, pp.1117-1123.

* Poesen J. (1999) – “*Criteria and instruments to control soil erosion*”, Proceedings of the Advanced Study Course on Desertification in Europe: Mitigation Strategies, Land Use and Planning, Emme G., Zanolla C, Peter D. eds., Alghero, 9pp.

* Presidenza del Consiglio dei Ministri, Servizi Tecnici Nazionali, Ufficio Idrografico e Mareografico di Napoli (dal 1951 al 1999) – “*Annali Idrologici*” – Istituto Poligrafico dello Stato – Roma

R

* Regione Emilia Romagna (2004) – “*Stima dell’erosione e bilancio dei solidi del Sillaro: applicazione del modello RUSLE e confronto con il monitoraggio del trasporto in sospensione*”, Inserto Erosione, Supplemento al n. 6/2004 della Rivista ARPA.

* Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter P.J. (1991) – “*RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation*”, Journal of Soil and Water Conservation. Jan-Feb, pp. 30-33

- * Renard K.G., Meyer L.D., Foster G.R. (1997) – “*Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*”, United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service – Handbook n. 703 – United States Government Printing Office, Washington, DC, pp. 407
- * Renard K.G., Freimund J.R. (1994) – “*Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE*”. *Journal of Hydrology*, 157, pp. 287-306
- * Römken M.J.M., Prasad S.N., Poesen J.W.A. (1986) – “*Soil erodibility and properties*” In: *Proceedings of the International Society of Soil Science* – Hamburg, pp. 492-504
- * Roose E.J. (1977) “*Application of the Universal Soil Loss Equation of Wischmeier and Smith in West Africa*”. In: Greenland J., Lal R.(Eds). *Conservation and Soil Management in the Humid tropics*. Wiley, Chichester, England, pp. 177-187

S

- * Salvemini A., Ventrella N.A. (1996) – “*Horst-Graben-Horst al margine nord-orientale dei Monti Picentini (Appennino Meridionale): un contributo dagli studi idrogeologici sugli acquiferi carsici di Caposele, Cassano Irpino e Quaglietta*”, *Mem. Soc. Geol. It.*, n.51, pp. 467-483
- * Scesi L., Papini M., Gattinoni P. (2003) – “*Geologia Applicata – applicazioni ai progetti di ingegneria civile*” – Casa Editrice Ambrosiana
- * Sciortino M., Colonna N., Ferrara V., Grauso S., Iannetta M., Svalduz A. (2000) – “*La lotta alla desertificazione in Italia e nel bacino del Mediterraneo*”, *Rivista Energia Ambiente e Innovazione*, n. 2/2000, pp. 30-39
- * Schumm S.A. (1956) – “*Evolution of drainage systems and slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey*”, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 67, pp. 597-646
- * Stone R.P., Hilborne D. (2000) – “*Universal Soil Loss Equation*”, Ministry of Agriculture, food and rural affairs - <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/00-001.htm#tab6>
- * Strahler A.N. (1952) – “*Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography*”, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 63, pp. 1117-1142
- * Strahler A.N. (1958) – “*Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms*”, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 69, pp. 279-300

- * Strahler A.N. (1965) - *"The Earth Science"*, Harpes & Row Publ., pp. 681
- * Svorin J. (2003) – *"A test of three soil erosion models incorporated into a geographical information system"*, Hydrological Processes, n. 17, pp. 967-977

T

- * Teklehaimanot G. (2003) – *"Use of simple field tests and revised MMF model for assessing soil erosion: case study Lom Kao Area, Thailand"*, ITC-MSc Thesis;
- * Travaglini D. (2004) – *"Trasformazioni tra sistemi di coordinate: software disponibili, limiti e potenzialità"*, Forest@, 1(2), pp. 128-134. On line: <http://www.sisef.it>

U

- * Usòn A., Ramos M.C. (2001) – *"An improved rainfall erosivity index obtained from experimental interrill soil losses in soils with a Mediterranean Climate"*, Catena, 43, pp. 293-305

V

- * van der Kniff J.M., Jones R.J.A., Montanarella L. (1999) – *"Soil Erosion Risk Assessment in Italy"*, European Commission Directorate General JRC – Space Application Institute – European Soil Bureau
- * Van Leeuwen W.J.D., Sammons G. (2003) – *"Seasonal Land Degradation Risk Assessment for Arizona"*, Proceedings of 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Honolulu, Hawaii, 10-14 Novembre 2003, pp. 378-381
- * Van Remortel R., Hamilton M. and Hickey R. (2001) – *"Estimating the LS factor for RUSLE through Iterative Slope Length Processing of Digital Elevation Data"* – Cartography, n. 30, pp. 27-35
- * Van Remortel R.D., Maichle R.W., Hickey R.J. (2004) – *"Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable"*, Computers & Geosciences, 130, pp. 1043-1053
- * Viparelli R. (1998) – *"Criteri per la sistemazione idraulica dei corsi d'acqua"*, (Linea 07) I Conferenza La.T.I.B.I. (Laboratorio di Tecnologie Informative per la pianificazione dei Bacini Idrografici), POP – FESR 1994-99; Potenza

* Vittorini S. (1965) – *“La valutazione quantitativa dell’erosione nei suoli argillosi pliocenici della Val d’Era”*, Atti XIX Congr. Geogr. It., 3, pp. 83-102

* Vivenzio F. (2002) – *“Utilizzazione di GIS per la valutazione dell’erosione e dell’apporto solido dai bacini idrografici. Il caso del fiume Testene”*. Tesi di laurea in Ingegneria per l’Ambiente e il Territorio, Università degli Studi di Napoli “FEDERICO II”.

W

* Walling D.E. (1983) – *“The sediment delivery problem”*, Journal of Hydrology, 65, pp. 209-237

* Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978) – *“Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning”*. United States Department of Agriculture – Handbook No. 537. United States Government Printing Office, Washington, DC

* Wischmeier W.H., Smith D.D.(1965) – *“Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains”* United States Department of Agriculture – Handbook No. 282. United States Government Printing Office, Washington, DC

* Wischmeier, W. H. (1976) - *“Use and misuse of the Universal Soil Loss Equation”*, Journal of Soil and Water Conservation, 31: 5-9.

* Wischmeier W.H., Mannering J.W. (1969) – *“Relation of soil properties to its erodibility”*, Soil Sci Soc Amer Proc., Vol. 33, N.1 Jan-Feb, pp. 131-137

* Wischmeier W.H., Johnson C.B., Cross V. (1971) – *“A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites”*, Journal of Soil and Water Conservation, 26, n. 5, pp. 189-193

Y

* Yalin M.S. (1963), *“An expression for bed-load transportation”*, J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 89(3), pp. 221-250

* Yu B., Rosewell C.J. (1996) – *“Rainfall erosivity estimating using daily rainfall amounts for South Australia”*, Australian Journal of Soil Research, 34(5), pp. 721-733;

Z

* Zaccagnini A. (2005) – *“Valutazione del trasporto solido dei versanti del bacino*

SITI INTERNET CONSULTATI

- * APAT - Agenzia per la Protezione dell' Ambiente e per i servizi Tecnici:
<http://www.sinanet.apat.it/site/it-IT/>
- * ARPA BASILICATA, Settore Informativo Monitoraggio Prevenzione e Controlli:
<http://www.settoreimpc.it/desertificazione/indicatori.asp>
- * ARPA PIEMONTE – Agenzia Regionale per la Protezione dell' Ambiente – Regione Piemonte: <http://ctntes.arpa.piemonte.it/tematiche/contaminazione.htm>
- * Commissione Europea: <http://ec.europa.eu/environment/civil/pdfdocs/pr98f07.pdf>
- * ECAF - European Conservation Agriculture Federation: www.ecaf.org/italia/First.html
- * ESRI: <http://www.esriitalia.it>
- * Giorgi G. (2005) – Corso di Geologia Ambientale: <http://www.geomin.unibo.it/geoamb/geoamb2.htm>
- * ISTAT - Istituto Nazionale di Statistica: <http://demo.istat.it/pop2004/index1.html>
- * ITC – International Institute for Geo-Information Science And Earth Observation:
http://www.itc.nl/library/Papers_2003/msc/nrm/Teklehaimanot.pdf
- * MEPAS – Multimedia Environmental Pollutant Assessment System:
http://mepas.pnl.gov/mepas/formulations/source_term/5_0/5_32/5_32.html
- * NASA: http://earthobservatory.nasa.gov/Library/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_4.html
- * REGIONE CAMPANIA SERVIZIO AGROMETEREOLOGIA:
<http://www.sito.regione.campania.it/agricoltura/meteo/agrometeo.htm>
- * SINANET APAT : <http://www.clc2000.sinanet.apat.it/cartanetclc2000/clc2000/index.asp>
- * UCEA – Ufficio Centrale di Ecologia Agraria del Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali: <http://www.politicheagricole.it/ucea/>
- * University of Arizona: <http://rangeview.arizona.edu/glossary/ndvi.html>
- * Van Remortel R., Hamilton M. and Hickey R. (2001): <http://www.cwu.edu/~rhiskey/slope/slope.html>

ALLEGATI

Allegato 1 – Fattori per l'applicazione del modello P.S.I.A.C. (Fonte: Scesi et al., 2003)

Classe di resa in sedimento	Litologia (a)	Suoli (b)	Clima (c)	Deflusso (d)	Topografia (e)	Copertura vegetale (f)	Uso del suolo (g)	Erosione areale (h)	Erosione lineare (fluviale) (i)
Elevata	(10)* Argilloscisti alternati ad arenarie e siltiti.	(10) Suoli a tessitura fine, facile dispersione; salini-alkalini. Elevate caratteristiche di contrazioni rigonfiamento. Grani isolati di limo e sabbia fine.	(10) Temporalmente che durano parecchi giorni con brevi periodi di piogge intense. Presenti gelo-disgelo.	(10) Elevati picchi di piena per unità di superficie. Notevole entità della portata per unità di superficie.	(20) Pendenze elevate (maggiori del 30%). Rilievi elevati. Pianure: assenti o quasi	(10) Copertura vegetale che non supera il 20%. Vegetazione sparsa. Presenza o meno di lettiera. Assenza di roccia affiorante	(10) Più del 50% della superficie è coltivata. Quasi tutta la superficie è soggetta a pascolo intensivo. Tutta la superficie recentemente percorsa dal fuoco	(25) Più del 50% della superficie è caratterizzata da erosione per rigagnoli e per fossi o da frane.	(25) Erosione di sponda continua o a frequenti intervalli, con notevole profondità della corrente e lunga durata della piena. Attiva erosione rimontante e demolizione nei corsi d'acqua tributari.
Moderata	(5) Rocce di media durezza. Moderatamente degradate. Moderatamente fratturate.	(5) Suoli a tessitura media. Frammenti grossolani occasionali. Orizzonti a «caliche» (croste calcaree)	(5) Temporalmente di moderata durata e intensità. Temporalmente convettivi poco frequenti	(5) Moderati picchi di piena. Moderate portate per unità di area.	(10) Moderate pendenze (minori del 20%). Sviluppo moderato di conoidi o di pianure.	(5) Copertura non eccedente il 40%. Notevole lettiera.	(0) Meno del 50% è coltivato. 50% o meno della superficie è stata recentemente disboscata. Meno del 50% è pascolato intensivamente. Strade e costruzioni nella normalità.	(10) 25% della superficie è caratterizzata da erosione per rigagnoli e per fossi o da frane. Erosione eolica.	(10) Moderata profondità della corrente, media durata delle piene, con occasionale erosione delle sponde o del letto.
Bassa	(0) Rocce compatte e dure.	(0) Elevata percentuale di frammenti grossolani aggregati di argilla. Elevato contenuto di sostanza organica	(0) Clima umido con piogge di bassa intensità. Precipitazioni nevose. Clima arido con temporali di bassa intensità. Aridità totale	(0) Bassi picchi di piena per unità di superficie. Basso volume di deflusso per unità di superficie. Rari eventi di deflusso.	(0) Pendenze deboli (minori del 5%). Estese pianure alluvionali.	(-10) Superficie completamente protetta da vegetazione. Frammenti di roccia. Scarsa possibilità che le piogge raggiungano il materiale erodibile.	(-10) Assenza di coltivazioni. Nessun disboscamento recente. Bassa intensità di pascolo.	(0) Nessun apparente segno di erosione.	(0) Corsi d'acqua ampi e poco profondi, con profili longitudinali piatti, breve durata delle piene. Corsi d'acqua in rocce non stratificate (massive), con grandi massi ben coperti da vegetazione. Corsi d'acqua sistemati.

* I numeri tra parentesi esprimono il valore da assegnare a ciascun fattore in funzione delle sue caratteristiche. Relativamente ai numeri suddetti, possono essere fatte interpolazioni fra le tre classi di resa in sedimento, sulla base dell'esperienza.

Allegato 2 – Tavole per l'applicazione del modello di Gavrilovic. Valori dei fattori Y, G e X. (Fonte: Scesi, 2003)

Valori del fattore di erodibilità del suolo Y Tipo di roccia-sottosuolo	Y
Rocce dure, resistenti all'erosione	0,2-0,6
Rocce semiresistenti all'erosione	0,6-1,0
Rocce friabili, stabilizzate (detriti di falda, scisti, argille compatte, ecc.)	1,0-1,3
Sedimenti, morene, argille e altre rocce poco resistenti	1,3-1,8
Sedimenti fini e terre, non resistenti all'erosione	1,8-2,0
Valori del fattore G esprimente i processi erosivi visibili Tipo e grado d'erosione nel bacino imbrifero	G
Erosione debole nel bacino	0,1-0,2
Erosione laminare sul 20-50% del bacino	0,3-0,5
Erosione laminare, detriti di falda e depositi incisi, erosione carsica	0,6-0,7
50-80% del bacino eroso per erosione lineare e per franamenti	0,8-0,9
Bacino interamente eroso per erosione lineare e per franamenti	1,0
Condizioni che influenzano i valori del coefficiente Bacino idrografico o superficie prima degli interventi contro l'erosione	Valore medio X
Terreno completamente denudato, non coltivabile	1,00
Campi lavorati secondo la linea di massima pendenza	0,90
Frutteti e vigneti senza vegetazione al suolo	0,70
Pascoli, boschi degradati e boscaglie con suolo eroso	0,60
Prati, campi di trifoglio e di altre colture simili	0,40
Boschi o boscaglie densi e id buona "struttura"	0,05
Condizioni che influenzano i valori del coefficiente Bacino idrografico o superficie dopo gli interventi contro l'erosione	Valore medio X
Sistemazione degli alvei, dighe, correzione dei torrenti	0,70
Campi lavorati secondo le curve di livello	0,63
Campi ben coltivati, fertilizzati con materia organica (mulch)	0,54
Campi coltivati a strisce (strip-cropping) e a rotazione	0,45
Campi con terrazzamenti o gradoni	0,36
Frutteti e vigneti lavorati secondo le curve di livello	0,32
Inerbimento di terreni denudati, miglioramento di pascoli e di prati	0,30
Canali di rallentamento del deflusso, piccoli bacini di raccolta d'acqua	0,27
Rete di canali che seguono le curve di livello, di densità media	0,24
Rimboschimento con gradoni	0,10

ALLEGATO 3 – DATI PIOVOSITÀ MEDIA MENSILE PER STAZIONE PLUVIOMETRICA PER IL PERIODO 1959-2004

Mese	STAZIONE																				
	Acerno (724 m s.l.m.)			Pontecagnano (31 m s.l.m.)			Eboli (170 m s.l.m.)			Battipaglia (72 m s.l.m.)			Giffoni Valle Piana (192 m s.l.m.)			Campagna (299 m s.l.m.)			Pontecagnano A.M. (34 m s.l.m.)		
	mm	gp	dp	mm	gp	dp	mm	gp	dp	mm	gp	dp	mm	gp	dp	mm	gp	dp	mm	gp	dp
Gennaio	205,2	12,3	16,7	103,4	9,1	11,4	130,8	10,3	12,7	131,1	10,8	12,1	156,8	10,6	14,8	212,4	11	19,3	125,4	10,3	12,2
Febbraio	177,3	11,5	15,4	99,8	8,0	12,5	114,3	9,5	12,0	110,8	9,8	11,3	135,5	9,8	13,8	171,7	10,3	16,7	93,4	8,6	10,9
Marzo	178,6	12,2	14,6	103,3	8,8	11,7	124,1	9,7	12,8	108,9	9,5	11,5	134,9	10,1	13,4	181,1	10,6	17,1	88,6	9,0	9,8
Aprile	184,2	13,3	13,8	77,0	7,6	10,1	104,1	10,1	10,3	83,2	9,2	9,0	128,1	10,8	11,9	134,0	10,8	12,4	69,7	8,9	7,8
Maggio	133,8	9,0	14,9	46,5	5,6	8,3	68,3	7,0	9,8	56,6	5,9	9,6	74,3	7,4	10,0	94,7	8,0	11,8	43,5	6,0	7,3
Giugno	67,6	5,9	11,5	29,4	3,5	8,4	32,0	4,2	7,6	33,5	4,0	8,4	49,1	4,9	10,0	55,4	5,3	10,5	28,8	3,5	8,2
Luglio	40,4	3,9	10,4	17,3	2,1	8,2	20,0	3,0	6,7	19,1	2,8	6,8	35,7	3,6	9,9	39,5	4,1	9,6	27,4	3,0	9,1
Agosto	64,3	5,3	12,1	29,0	2,6	11,2	54,0	3,6	15,0	39,4	3,3	11,9	49,2	4,1	12,0	61,7	4,8	12,9	45,5	3,6	12,6
Settembre	135,3	7,8	17,3	60,2	5,2	11,6	83,9	6,2	13,5	77,1	6,0	12,9	110,9	6,8	16,3	107,6	6,9	15,6	89,2	6,0	14,9
Ottobre	200,7	10,5	19,1	125,4	6,9	18,2	147,3	8,3	17,7	133,6	7,7	17,4	173,7	9,1	19,1	164,6	8,9	18,5	136,1	8,4	16,2
Novembre	265,1	12,5	21,2	150,4	10,2	14,7	166,3	11,3	14,7	155,4	10,5	14,8	207,2	11,5	18,0	235,0	12,2	19,3	156,7	11,0	14,2
Dicembre	263,3	13,2	19,9	178,0	12,0	14,8	143,8	10,0	14,4	163	11,5	14,2	196,0	11,5	17,0	252,6	12,7	19,9	147,2	12,0	12,3
Tot anno	1915,8	117,4	187,0	1019,7	81,6	141,1	1188,9	93,2	147,3	1111,7	91,0	139,9	1451,4	100,2	166,3	1710,3	105,6	183,5	1051,5	90,3	135,5
n. dati	26			22			24			33			40			24			22		



mese più piovoso
mese meno piovoso

Note:

mm = Valori medi mensili delle precipitazioni

gp = Valori medi mensili del numero dei giorni piovosi

dp = Valori medi mensili della densità di precipitazione (=mm/gp)

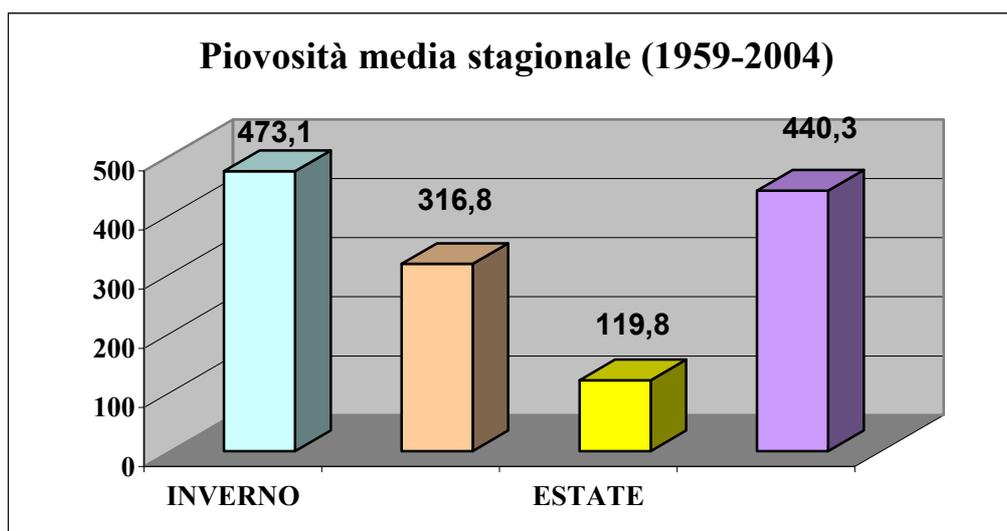
n. dati = numero di anni dei dati disponibili per la stazione nel periodo considerato

I giorni con piovosità minore di 1 mm non sono stati considerati come giorni piovosi.

ALLEGATO 4 – Valori di piovosità media stagionale (periodo 1959-2004).

Stazione	Inverno (dic-feb)			Primavera (mar-mag)			Estate (giu-ago)			Autunno (set-nov)		
	mm	gp	dp	mm	gp	dp	mm	gp	dp	mm	gp	dp
Acerno	645,8	37,0	17,5	496,6	34,5	14,4	172,3	15,1	11,4	601,1	30,8	19,5
Pontecagnano	381,2	29,1	13,1	226,8	22,0	10,3	75,7	8,2	9,2	336,1	22,3	15,1
Eboli	388,9	29,8	13,1	296,5	26,8	11,1	106,0	10,8	9,8	397,5	25,8	15,4
Battipaglia	404,9	32,1	12,6	248,7	24,6	10,1	92,0	10,1	9,1	366,1	24,2	15,1
Giffoni Valle Piana	488,3	31,9	15,3	337,3	28,3	11,9	134,0	12,6	10,6	491,8	27,4	17,9
Campagna	636,7	34,0	18,7	409,8	29,4	13,9	156,6	14,2	11,0	507,2	28,0	18,1
Pontecagnano A.M.	366	30,9	11,8	201,8	23,9	8,4	101,7	10,1	10,1	382	25,4	15,0

NOTE: mm = piovosità media stagionale; gp = giorni piovosi medi stagionali, dp = densità di pioggia media stagionale



**ALLEGATO 5 - Valori medi mensili delle temperature massime, minime, medie e delle escursioni termiche.
Periodo di osservazione 1963-1999**

STAZIONE	GENNAIO				FEBBRAIO				MARZO				APRILE			
	Max	Min	Med	Est	Max	Min	Med	Est	Max	Min	Med	Est	Max	Min	Med	Est
Eboli	13,4	5,5	9,4	7,9	13,8	5,6	9,7	8,2	15,5	6,6	11,1	8,9	18,2	8,6	13,4	9,6
Pontecagnano AM	13,1	4,0	8,6	9,1	13,6	4,6	9,1	9,0	15,7	5,5	10,6	10,2	18,7	7,8	13,2	10,9
Battipaglia	12,4	5,7	9,1	6,6	13,2	6,3	9,7	7,0	14,4	6,9	10,6	7,5	17,4	9,0	13,2	8,4

STAZIONE	MAGGIO				GIUGNO				LUGLIO				AGOSTO			
	Max	Min	Med	Est												
Eboli	23,2	13,1	17,9	10,2	26,6	15,3	20,9	11,3	29,9	18,0	24,0	11,9	30,2	18,4	24,3	11,8
Pontecagnano AM	23,1	11,3	17,2	11,9	26,7	14,7	20,7	12,0	29,3	16,8	23,0	12,5	29,4	16,5	23,0	12,9
Battipaglia	22,1	12,4	17,2	9,7	26,7	16,3	21,5	10,5	29,7	19,2	24,5	10,5	30,6	20,7	25,9	9,8

STAZIONE	SETTEMBRE				OTTOBRE				NOVEMBRE				DICEMBRE			
	Max	Min	Med	Est	Max	Min	Med	Est	Max	Min	Med	Est	Max	Min	Med	Est
Eboli	26,8	16,1	21,5	10,7	22,2	12,6	17,4	9,7	17,2	8,7	12,9	8,5	14,0	6,3	10,2	7,7
Pontecagnano AM	26,6	14,7	20,6	12,0	22,0	10,4	16,2	11,5	17,8	7,5	12,6	10,3	14,1	5,0	9,5	9,1
Battipaglia	27,9	17,8	22,9	10,1	23,1	13,9	18,5	9,2	17,7	9,7	13,7	8,0	13,7	6,7	10,2	7,0

Note: Max = Temperatura massima media mensile; Min = Temperatura minima media mensile; Med = Temperatura media mensile; Est = Escursione termica media mensile. Unità di misura: °C.

Dati disponibili per le stazioni nel periodo indicato: Eboli - 20 anni, Battipaglia - 18 anni, Pontecagnano - 15 anni

ALLEGATO 6 – Dati di piovosità totale annua (P_T), piovosità massima giornaliera (MG) e piovosità massima oraria (MO) e numero di giorni piovosi medi (NGP).**Periodo di osservazione 1951- 1999****STAZIONE DI ACERNO (724 m s.l.m.) –****32 anni di dati a disposizione nel periodo di osservazione**

<i>Anno</i>	<i>P_T</i> (mm)	<i>MG</i> (mm)	<i>MO</i> (mm)	<i>NGP</i>
1999	2316,8	205,0	19,0	121
1998	2021,8	170,0	20,0	107
1997	1499,2	93,8	23,0	95
1996	2311,1	92,2	59,8	131
1995	1845,0	98,6	41,0	111
1994	1556,0	64,2	38,8	97
1990	1822,6	111,0	50,0	111
1985	1701,2	124,8	36,2	104
1984	2304,6	111,6	41,0	141
1983	1425,0	98,8	33,0	112
1982	1505,8	137,8	39,0	86
1981	2090,0	119,4	26,0	118
1980	2399,6	107,6	25,8	128
1979	2814,6	101,4	33,0	140
1978	2402,0	132,0	53,0	150
1977	1733,4	132,2	50,0	103
1976	2903,0	211,6	37,0	146
1975	1436,6	113,0	29,0	96
1974	2433,6	107,6	40,0	121
1973	1719,6	100,0	32,6	114
1972	1816,4	88,4	24,6	140
1971	1659,2	110,4	41,8	109
1961	1594,0	79,5	48,0	99
1960	1521,0	49,5	20,0	140
1959	1281,3	44,0	22,5	121
1958	1868,6	97,0	50,0	97
1957	1382,8	74,5	33,0	ND
1956	1456,4	77	16,5	ND
1955	1996,6	102,2	22	ND
1954	1603,8	121,8	24,7	ND
1953	1439,1	99,0	15,0	ND
1952	1654,3	81,8	30,0	ND

**STAZIONE DI BATTIPAGLIA (58 m s.l.m.) –
31 anni di dati a disposizione nel periodo di osservazione**

<i>Anno</i>	<i>P_T</i> <i>(mm)</i>	<i>MG</i> <i>(mm)</i>	<i>MO</i> <i>(mm)</i>	<i>NGP</i>
1987	918,4	51,8	28,0	85
1986	1077,8	68,6	24,8	95
1985	1026,4	53,2	20,6	78
1984	1180,2	67,0	30,0	92
1983	671,4	45,0	30,0	80
1982	918,0	51,2	38,4	78
1981	1216,6	80,0	34,0	91
1980	1313,0	69,0	46,8	96
1979	1274,6	59,2	32,0	107
1978	1100,0	71,0	24,0	108
1977	936,2	65,4	59,0	91
1976	1394,4	65,0	ND	118
1975	1010,6	50,8	ND	89
1974	1246,8	67,0	20,0	92
1973	1077,8	58,0	21,0	75
1972	1047,8	56,0	31,0	89
1971	1149,0	65,0	23,0	98
1970	977,8	62,6	49,2	91
1969	1317,4	66,0	34,0	110
1968	963,9	51,4	18,4	89
1967	1153,8	63,6	40,0	74
1964	1356,0	43,8	ND	95
1963	1248,0	105,0	ND	99
1962	1036,3	45,9	ND	82
1961	1348,7	43,0	ND	81
1960	1520,9	41,0	ND	107
1959	1126,1	78,8	ND	101
1958	947,3	35,9	ND	95
1957	658,0	40,0	ND	69
1956	1340,3	72,0	ND	95
1955	1076,5	65,0	ND	101

STAZIONE DI CAMPAGNA (299 m s.l.m.) –

30 anni di dati a disposizione nel periodo di osservazione				
<i>Anno</i>	<i>P_T</i> (mm)	<i>MG</i> (mm)	<i>MO</i> (mm)	<i>NGP</i>
1999	1768,0	101,8	21,2	106
1998	1753,2	139,6	25,4	105
1984	1605,0	69,6	ND	108
1979	1877,4	86,6	44,2	116
1978	1681,6	77,0	28,2	124
1977	1404,2	86,8	25,6	93
1976	2171,8	109,8	38,0	130
1975	1273,2	114,8	38,0	87
1974	1810,2	116,2	37,0	105
1973	1464,8	124,6	34,0	94
1972	1624,2	81,4	39,0	119
1971	1662,2	106,6	24,4	123
1970	1673,6	66,0	ND	117
1969	2072,4	89,6	27,0	122
1968	1087,6	62,6	22,0	88
1967	1561,8	75,2	26,8	94
1966	2329,8	99,0	40,0	124
1965	1575,4	72,2	38,2	98
1964	2276,2	114,0	ND	97
1963	2316,6	210,0	ND	95
1962	1848,2	145,0	ND	83
1961	1057,6	ND	ND	80
1960	1529,3	48,5	ND	115
1959	1624,1	85,0	24,0	109
1958	1515,1	71,0	19,0	109
1956	1471,9	77,0	16,6	107
1955	1486,5	94,5	23,0	113
1954	1514,5	94,0	40,0	115
1953	1200,9	91,0	30,0	88
1951	1442,7	91,5	33,0	94

**STAZIONE DI EBOLI (170 m s.l.m.) –
24 anni di dati a disposizione nel periodo di osservazione**

<i>Anno</i>	<i>P_T</i> <i>(mm)</i>	<i>MG</i> <i>(mm)</i>	<i>MO</i> <i>(mm)</i>	<i>NGP</i>
1999	973,6	36,6	ND	85
1997	715,4	36,6	18,8	67
1994	624,1	34,4	21,0	64
1993	1026,0	94,0	38,8	68
1991	838,8	38,6	33,0	84
1990	1107,2	62,6	34,6	95
1989	825,6	66,4	ND	71
1988	935,8	67,0	ND	86
1987	969,6	51,0	19,4	88
1986	1155,0	77,0	28,0	96
1985	1083,6	68,0	20,0	81
1980	1535,6	63,8	45,2	110
1979	1665,6	76,2	52,0	118
1978	1409,4	59,0	30,0	112
1977	1082,8	56,2	46,0	82
1976	1712,6	84,2	51,0	112
1975	1207,0	77,0	50,0	84
1974	1643,7	87,6	36,0	11
1973	1202,6	58,0	28,0	91
1972	1343,9	65,0	31,0	104
1971	1437,2	78,0	28,0	108
1970	1306,2	59,8	47,6	97
1969	1564,0	64,6	ND	115
1959	1172,0	68,0	ND	106

**STAZIONE DI GIFFONI VALLE PIANA (192 m s.l.m.) –
49 anni di dati a disposizione nel periodo di osservazione**

<i>Anno</i>	<i>P_T</i> <i>(mm)</i>	<i>MG</i> <i>(mm)</i>	<i>MO</i> <i>(mm)</i>	<i>NGP</i>
1999	1368,2	97,4	26,0	108
1998	1289,2	82,6	36,0	90
1997	1053,2	73,0	28,8	75
1996	1769,2	126,8	37,8	109
1995	1414,2	130,4	46,8	97
1994	1113,0	59,0	41,0	89
1993	1130,2	91,8	15,0	76
1992	810,2	55,4	ND	83
1991	1028,6	47,6	ND	95
1990	1309,8	91,0	50,6	92
1989	1244,2	96,4	52,6	69
1988	1406,2	96,4	36,0	92
1987	1314,4	54,6	47,6	99
1986	1474,6	99,0	59,4	104
1985	1277,8	155,4	ND	77
1984	1268,0	62,6	21,4	105
1983	922,8	58,0	30,0	89
1982	1482,0	104,0	46,0	87
1981	1289,6	50,0	ND	92
1980	1504,6	83,0	31,0	115
1979	1646,8	78,0	34,6	115
1978	1411,6	74,0	24,0	123
1977	1139,4	94,6	30,0	80
1976	2256,0	177,2	49,0	119
1975	1428,8	79,0	37,0	88
1974	1930,6	100,2	62,0	113
1973	1628,2	65,8	50,6	92
1972	1522,8	89,4	30,0	107
1971	1898,6	97,0	31,0	119
1970	1637,0	115,0	49,0	115
1969	2338,6	94,8	40,0	135
1968	1440,6	138,0	35,0	ND
1967	1264,3	100,0	ND	75
1966	1784,2	190,0	ND	116
1965	1209,2	65,0	ND	110
1964	1698,6	78,0	ND	91
1963	1805,9	81,2	25,6	118
1962	1493,1	90,8	24,0	105
1961	1456,8	95,6	47,0	98
1960	1510,8	45,5	37,0	124
1959	1520,4	72,0	27,0	115
1958	1376,9	79,2	26,0	108
1957	1044,3	63,5	30,0	99
1956	1273,4	60,5	18,5	105
1955	1403,3	77,6	26,0	120
1954	1445,8	247,2	54,0	106
1953	1245,2	66,6	29,5	87
1952	1468,9	70,4	29,5	115
1951	1407,2	122,2	30,7	94