

Analisi morfometrica del DTM e definizione di unità di paesaggio finalizzate alla realizzazione delle tipologie di suolo e delle unità cartografiche del bacino del fiume Ombrone (Regione Toscana)

Mari Riccardo (*), Gardin Lorenzo (**), Nevini Roberto (**), Callegari Ivan (***), Perna Massimo (*), Manetti Francesco (*), Lavorini Guido (****), Nevini Iacopo (**), Arcidiaco Maria (***), Bianconi Nadia (***), Ortolano Fabrizio (***)

(*) Consorzio LAMMA, Via Madonna del Piano n.10 Edificio D, Piano Primo
50019 Sesto Fiorentino (FI), Italy, Tel. 055448301, Tel. +39 055 44 830.1

(**) Private consultant

(***) Centro di GeoTecnologie, Università degli Studi di Siena Via Vetri Vecchi, 34
52027 San Giovanni Valdarno (AR), Italy, Tel. 055 911 9400, Fax +39 055-9119439

(****) Regione Toscana, Sistema Informativo Territoriale e Ambientale, P.O. Geologia e BD Geotematiche

Riassunto

Per paesaggio si intende quell'insieme di caratteristiche del territorio che distinguono una certa area di superficie terrestre da un'altra, e che tali caratteristiche sono il risultato non solo di forze naturali ma anche dell'azione dell'uomo. E' largamente condiviso come esista una stretta corrispondenza fra determinati paesaggi e i suoli presenti su di essi.

La metodologia per realizzare una copertura continua di unità di pedopaesaggio (cioè zone con suoli che hanno avuto la stessa formazione e che presentano simili caratteri morfologici) per tutto il bacino del fiume Ombrone, si è basata su tecniche moderne basate su elaborazioni GIS e su banche dati georeferenziate. Non essendo possibile realizzare un'analisi territoriale di dettaglio in modo continuo su tutto il bacino del fiume Ombrone, per motivi di costi e di tempi, si è preferito procedere per aree campione rappresentative della variabilità del territorio in esame.

Per la creazione di Unità di Paesaggio coerenti a quelle identificate nelle aree campione, sono state messe a punto delle tecniche di "classificazione automatica" e "classificazione semi-automatica" del territorio, che si basano in estrema sintesi sull'analisi di indici morfometrici derivati dal DEM, quali la pendenza, l'esposizione, la curvatura longitudinale ed orizzontale (concavità e convessità), la lunghezza dei versanti, la dimensione e la densità e il pattern di drenaggio. Queste tecniche hanno preso spunto da metodologie elaborate da vari autori (Hengl, T. and Rossiter, D.G., 2003; MacMillan et al., 1997).

L'estrazione delle forme del terreno è stata eseguita su alcune aree campione scelte in modo da riflettere sia la variabilità morfometrica sia quella dell'informazione pedologica presente all'interno del bacino del fiume Ombrone, al fine di testare il più possibile l'attendibilità delle tecniche di classificazione sia automatiche sia semiautomatiche utilizzate.

Abstract

With landscape we mean that set of environmental characteristics that distinguish a specific earth's surface area from another, and that these characteristics are the result of both natural and human activity.

It is widely recognized that there is a strict relationship between landscapes and their soils.

Methodology to realize a complete coverage of pedo-landscapes units (that is landscape units having same formation soils and similar morphological characters) all over Ombrone river's basin, was based on modern techniques of GIS processing using georeferenced datasets. Because of cost and time, it was not possible to lead a detailed analysis of the entire Ombrone river basin, so it was

decided to choose sample areas which could represent the variability of the study area. In order to create Landscape Units coherent with the ones identified in sample areas, “automatic” and “semi-automatic” classification techniques were developed, based, in a nutshell, on DEM derived morphometric indexes analysis. Such indexes as slope, aspect, horizontal and vertical curvature (concavity and convexity of slope), slope length, hydrographic drainage network dimension, density and pattern were considered. These techniques have been inspired by methodologies developed by various authors (Hengl, T. and Rossiter, D.G., 2003; MacMillan et al., 1997). Landform extraction was realized on specific sample areas able to represent morphometric and pedologic variability in Ombrone river basin, in order to verify both automatic and semi-automatic classification techniques used.

Materiali e Metodi

Le banche dati territoriali georeferenziate disponibili per il Bacino dell’Ombrone inerenti ai fattori della pedogenesi sono state utilizzate per lo studio dei caratteri ambientali e per le successive fasi di stratificazione del territorio.

In particolare sono state utilizzate: la carta geologica regionale in scala 1:10.000, sia in formato vettoriale sia in formato raster georeferenziato al fine di utilizzare anche elementi preziosi come gli affioramenti non riportati in vettoriale; la carta dell’uso del suolo proveniente da recenti realizzazioni dettagliate; la carta della vegetazione forestale potenziale derivata dall’inventario forestale regionale; elaborazioni di scala regionale inerenti il clima realizzate dal Lamma nel corso del Progetto DesertNet; le Ortofoto del 2006, il DEM con passo 10 m e i suoi indici derivati; per la parte pedologica si è fatto uso dei cataloghi relativi al Progetto Carta pedologica della Regione Toscana in scala 1:250.000; sono stati anche consultati gli studi pedologici di dettaglio realizzati nel Bacino dell’Ombrone nel corso degli ultimi anni.

In accordo con quanto descritto e proposto nel “Progetto Pedologia” del Servizio Geologico della Regione Toscana, sono state realizzate le Unità di paesaggio (UDP) all’interno di aree campione selezionate per la loro significatività nel bacino idrografico dell’Ombrone. La scelta di tali aree ha previsto un’analisi molto accurata dei Sistemi di terre, contenitori pedopaesaggistici di livello superiore, al fine di selezionare porzioni di territorio che comprendessero la maggior variabilità litologica e pedologica. I Sistemi di terre possono essere considerati come ambienti caratterizzati da una peculiare combinazione di fattori fisici (litologia, clima, processi morfogenetici, vegetazionali, di uso del suolo ed antropici), che hanno condizionato sia la formazione e le proprietà dei suoli, sia l’aspetto del paesaggio. Per tale motivo essi sono stati utilizzati sia come contenitore sintetico di informazioni sui suoli e sul paesaggio, sia come strumento per il trasferimento di informazioni pedologiche.

Riteniamo importante per la comprensione dell'articolo fornire qui di seguito una serie di definizioni:

Soil Region (SR): livello di pedopaesaggio di più alta generalizzazione (scala nazionale ed europea) definito dal clima e dalla litologia.

Sistema: è una suddivisione della Soil Region; il Sistema è un contenitore di pedopaesaggi di livello intermedio (scala nazionale e regionale), definito da paesaggi geografici caratterizzati dalla litologia, dalla morfologia e dall'uso del suolo.

Sottosistema: livello di paesaggio al quale sono associate le informazioni pedologiche nella carta dei suoli in scala 1:250.000 (scala regionale); sono definiti da litologia e secondariamente da morfologia e uso del suolo.

Unità cartografica (UC): descrive un modello di distribuzione dei suoli tipico e ricorrente per ciascun tipo di sottosistema di paesaggio; è caratterizzato da una sigla univoca nella quale sono concatenate le sigle delle tipologie pedologiche principali in essa presenti (es. PON1_MRS1_PGG1 è l'unità cartografica al cui interno sono prevalenti i suoli PON1 Pontepetri, MRS1 Maresca e PGG1 Poggio di petto).

Unità di paesaggio (udp): livello paesaggistico di semidettaglio (rappresentabile alla scala 1:25.000 – 1:50.000). Nella carta dei suoli 1:250.000 non sono rappresentati graficamente ma talvolta sono esplicitate nelle descrizioni delle unità cartografiche e nelle descrizioni delle tipologie pedologiche. Le unità di paesaggio sono porzioni di territorio all'interno delle quali i principali fattori della pedogenesi sono generalmente costanti (litologia, fisiografia, uso del suolo) e si può nella maggior parte dei casi ragionevolmente ipotizzare la presenza di un suolo dominante e di altri secondari.

Area campione: è una porzione di una unità cartografica del Livello 1, all'interno della quale vengono individuate e delimitate le unità di paesaggio di scala maggiore, mediante fotointerpretazione. Per ognuna di esse si caratterizzano i suoli presenti mediante rilevamento pedologico.

Nell'individuazione delle unità cartografiche ove ubicare le aree campione è stato importante considerare la loro ampiezza per sceglierne eventualmente alcune porzioni o tutte intere se fossero di piccole dimensioni. Indicativamente l'ampiezza di un area campione è stata intorno a 1.000-2.500 ettari; con tale ampiezza il rilevamento in esse previsto, da 20 a 40 osservazioni di cui da 2 a 4 profili, assume la scala del semidettaglio (1:50.000) con lo standard di 0,5 osservazioni ogni cmq di carta (standard internazionali).

Per la scelta di ogni area campione è stata fatta molta attenzione al contenuto informativo pedologico proveniente dalle geometrie della carta pedologica in scala 1:250K, all'accessibilità dei luoghi (strade, etc.) e alla presenza di lavori pedologici pregressi e di profili o pozzetti.

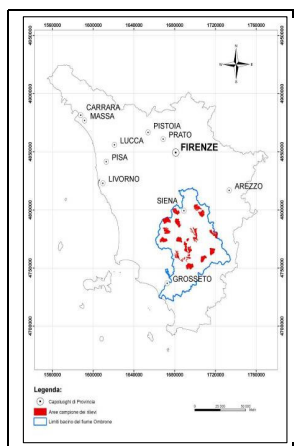


Figura 1 – Bacino idrografico del Fiume Ombrone.

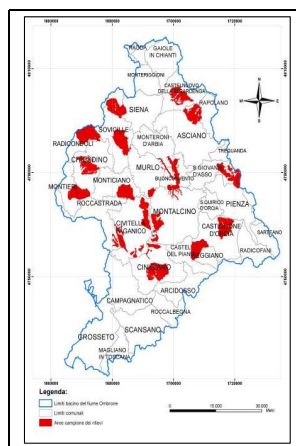


Figura 2 – Aree campione del progetto.

Selezione delle aree campione

Per la scelta delle aree campione su cui concentrare il rilevamento pedologico, in accordo alla metodologia descritta nei precedenti paragrafi, sono stati analizzati i livelli di paesaggio descritti nel Progetto Carta dei Suoli in scala 1:250000, dalle “Soil region” ai “Sistemi di terre” fino ai “Sottosistemi di terre”, analizzando e studiando a fondo le unità cartografiche, ovvero la distribuzione dei suoli nei sottosistemi. In base alle conoscenze pregresse ed anche alle dimensioni delle stesse alla qualità del livello informativo in esse presenti, si è deciso di selezionare per la campagna le 17 UC che coprono la maggior parte del Bacino, mentre le altre 25 sono state analizzate tramite fotointerpretazione, elaborazioni GIS, e supportate soltanto da controlli speditivi di campo, per giungere ugualmente all'attribuzione delle tipologie di suolo per le differenti unità di paesaggio individuate.

Creazione delle Unità di Paesaggio

Una volta individuate e delineate le aree campione, la realizzazione delle Unità di paesaggio al loro interno è stata effettuata tramite l'interpretazione stereoscopica di foto aeree disponibili presso l'archivio regionale; oltre al volo EIRA, anno 1975, scala 1:13.000 circa, presente su tutto il territorio regionale e con il quale è stata realizzata la fotointerpretazione per la carta geologica, si è fatto uso anche del volo alto del 1978, in scala 1:33.000 circa.

Per approfondire le conoscenze sulle caratteristiche dei suoli e per agevolare la comprensione della loro ubicazione all'interno dei vari paesaggi e fornire quindi le chiavi interpretative al successivo lavoro del fotointerprete, si sono raccolti tutti i lavori pedologici pregressi disponibili sia in rete che in biblioteche universitarie e di enti territoriali; nei casi più fortunati sono state rintracciate cartografie in formato vettoriale, in altri casi scansioni delle carte pedologiche georeferite, in ultimo pubblicazioni solo cartacee. Tutti i prodotti sono tuttavia risultati di grande utilità.

L'interpretazione delle foto aeree è avvenuta all'interno delle aree campione verificando la relazione di queste con le unità litologiche della Carta Geologica 1:10.000, facendo propri il più possibile i limiti geologici, risultato di un accurato rilevamento di campo; essa ha utilizzato il metodo dell'analisi fisiografica, ritenuta la più valida per la delineazione della Unità di paesaggio. La fotointerpretazione e la messa a punto della legenda di fotointerpretazione è stata affinata da sopralluoghi in campo. Per ogni area campione è stato realizzato un breve report descrittivo della fotointerpretazione realizzata, di alcune indicazioni utili e necessarie per il rilevamento di campo e della legenda delle unità di paesaggio individuate.

Tecniche semi-automatiche di creazione delle Unità di Paesaggio

Per la creazione di Unità di Paesaggio in tutta la superficie del bacino dell'Ombrone, coerenti a quelle identificate nelle aree campione, sono state messe a punto delle tecniche di "classificazione automatica" e "classificazione semi-automatica" del territorio, che si basano in estrema sintesi sull'analisi di indici morfometrici derivati dal DEM, quali la pendenza, l'esposizione, la curvatura longitudinale ed orizzontale (concavità e convessità), la lunghezza dei versanti, la dimensione e la densità dei bacini idrografici, il pattern di drenaggio. Queste tecniche, che hanno preso spunto da metodologie elaborate da vari autori (ad es. Hengl, T. and Rossiter, D.G., 2003; MacMillan et al., 1997), hanno consentito una descrizione quantitativa dei parametri morfometrici del territorio, ne hanno qualificato le informazioni e ridotto la soggettività usata nel discretizzare il territorio.

La classificazione semi-automatica ha aiutato ad interpretare con più chiarezza i processi legati alle forme del territorio e, di conseguenza, la possibile genesi del suolo. Utilizzando le Unità di Paesaggio precedentemente realizzate con la fotointerpretazione nelle aree campione, si è cercato di mettere in evidenza i processi legati all'energia di versante e al movimento dell'acqua che "guidano" fortemente la pedogenesi. Successivamente con la classificazione automatica e semiautomatica si è esteso il lavoro del fotointerprete a tutta l'area di studio. Tale metodologia è stata di supporto al foto interprete ed lo ha guidato, ove con maggiore efficacia ove meno, nell'apposizione dei limiti.

Estrazione degli indici morfometrici dal DEM e derivazione delle forme del terreno e delle Unità di Paesaggio tramite tecniche di classificazione non-supervisionata.

Per l'estrazione degli indici morfometrici è stato utilizzato il modello digitale del terreno realizzato dalla Regione Toscana.

Il DEM ha il valore di quota applicato a una cella di 10 m di lato ed è derivato dai dati altimetrici della CTR10K. L'accuratezza deriva dal dato originale di CTR. Poiché nelle vette e sui crinali la mancanza di un valore di quota può determinare appiattimenti e terrazzamenti impropri, il modello digitale del terreno ha subito un'operazione di rinfittimento dei punti quotati nelle zone suddette. Successivamente sono state eseguite, tramite opportuni algoritmi, alcune correzioni finalizzate a rendere il DEM idrologicamente corretto.

Gli indici morfometrici estrapolati dal modello digitale, e da noi utilizzati, sono riportati nella seguente tabella:

<i>Attributo</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valori</i>	<i>Caratterizzazione</i>
Slope	gradi	0...90	pendenza
Plan curvature	1/100m	-30...30	Curvatura del terreno ortogonale alla linea di massima pendenza
Profile curvature	1/100m	-30...30	Curvatura del terreno lungo la linea di massima pendenza
Flowaccumulation	Numero di celle	NA	Accumulo di flusso
Topographic Wetness Index	Senza unità	NA	Tendenza dell'acqua ad accumularsi in un qualsiasi punto del paesaggio

Figura 3 – Indici morfometrici.

L'estrazione delle forme del terreno è stata effettuata su alcune aree campione scelte in modo da riflettere sia la variabilità morfometrica che quella dell'informazione pedologica presente all'interno del bacino del fiume Ombrone, al fine di testare il più possibile l'attendibilità delle tecniche di classificazione sia automatiche che semiautomatiche testate.

Si è scelto di sfruttare le potenzialità del software OpenSource SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) in quanto la maggior parte dei suoi moduli sono finalizzati proprio alle analisi geomorfometriche. Uno dei principali obiettivi della geomorfometria è proprio quello di automatizzare il più possibile l'estrazione dei parametri e degli oggetti relativi alle forme del terreno e lo studio delle loro proprietà. Inoltre sono molti i riferimenti bibliografici che fanno uso di questo software proprio per l'estrazione supervisionata e non, delle "landforms", anche con l'uso integrato di altri software quali ILWIS e R.

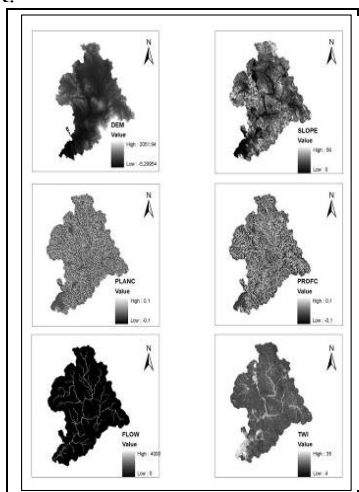


Figura 4 – Indici morfometrici.

Oltre agli indici morfometrici sopra elencati, per meglio individuare le molteplici informazioni del paesaggio da esaminare, sono state utilizzate, come aiuto alla fotointerpretazione e alla spazializzazione, anche le immagini Landsat TM del 2003, l'NDVI, la radiazione solare (calcolata

tramite il tool Incomin Solar Radiation del software SAGA 2.0.3) e la classificazione delle Landform secondo la metodologia Pennock, D.J. and Corre, M.D., 2001.

Non tutti gli indici sono stati utilizzati in maniera congiunta, ma se ne è fatto un uso specifico a seconda della morfologia dell'area da analizzare.

Approccio metodologico per la spazializzazione delle unità di paesaggio

È risultato fin da subito di estrema importanza conoscere approfonditamente le caratteristiche dei suoli dell'UC (vedi paragrafo successivo "Anagrafe dell'Unità Cartografica") su cui ci si appresta a lavorare utilizzando il lavoro del "Progetto Carta dei Suoli in scala 1:250.000 della Regione Toscana".

L'UC viene visualizzata nel suo insieme in modo tale da poter individuare, anche tramite l'uso di ortofoto e di alcuni indici morfometrici (pendenze, esposizione, ecc...), il perimetro ottimale dell'area campione. Si procede quindi alla realizzazione di una prima fotointerpretazione dando più peso a quegli elementi che, dato il contesto nel quale si sta operando, sono considerati più discriminanti per l'individuazione delle Unità di Paesaggio (pendenze piuttosto che uso suolo, forma più che l'esposizione...); tali elementi vanno annotati in modo tale da utilizzarli per l'esecuzione della "classificazione non supervisionata" (Figura 5).

Per lo svolgimento di tali attività è stato utilizzato ed adattato il metodo descritto in "A Practical Guide to Geostatistical Mapping" (vedi rif. bibl.).

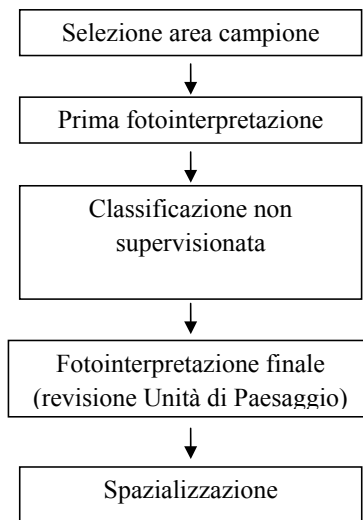


Figura 5 – Flusso di lavoro.

Con la classificazione non supervisionata (fuzzy k-means clustering) vengono estratte le classi geomorfologiche. Per ragioni pratiche si è deciso che 12 classi possono essere sufficienti. Successivamente vengono valutate le corrispondenze con la fotointerpretazione precedentemente svolta e vengono eseguiti gli opportuni accorpamenti tra le classi fino ad ottenerne un numero coerente con la legenda dell'Unità di Paesaggio studiata. Questa attività prevede:

confronto visivo in ambiente GIS tra il grid unsupervised e l'acclività (che viene individuato come l'indice morfometrico prioritario) utilizzando come riferimento la legenda della UDP per l'Unità Cartografica in esame.

accorpamento di due o più classi, e attribuzione della classe individuata alla UDP più rappresentativa.

Successivamente si è proceduto alla vettorializzazione del grid unsupervised e alla fase di smoothing ed eliminate per ottenere il risultato finale in formato vettoriale.

Di seguito si riporta, a titolo di esempio, la descrizione delle attività svolte in una delle UC individuate.

L'Unità Cartografica in questione è la **QUERCIA-CERVOGNANO (QUE1_CRV1)** (Figura 6) che nel 250K viene descritta con una litologia principale costituita da Argille plioceniche, con una morfologia costituita da versanti con pendenze prevalentemente deboli soggetti ad erosione idrica diffusa moderata, e contenuti fenomeni di dissesto e con un uso del suolo rappresentato da seminativi nudi e subordinatamente prati e bosco; negli ultimi anni sono diffusi gli impianti di vigneti specializzati. Le unità di paesaggio individuate mediante fotointerpretazione nell'area campione del Progetto "Ombrone" relative all'UC QUE1_CRV1 sono indicate in figura 6.

Udp	Descrizione Unità di paesaggio
105_1	Superfici sommitali convesse, poco estese, di forma allungata, da subpianeggianti a debolmente pendenti, soggetti ad erosione idrica di tipo diffuso da moderata a forte, su argille ed argille-limose plioceniche di origine marina occupate da seminativi non irrigui e prati.
105_2	Versanti prevalentemente lineari o poco incisi, da debolmente a moderatamente pendenti, soggetti ad erosione diffusa moderata con ricorrenti fenomeni di erosione di massa, su argille ed argille-limose plioceniche di origine marina occupate da seminativi non irrigui e prati.
105_3	Versanti lineari a pendenza da moderata a forte, soggetti ad erosione idrica di tipo diffuso generalmente forte, con presenza di forme calanchive, su argille ed argille siltose, occupate principalmente da formazioni boscate a dominanza di latifoglie termofile e secondariamente di seminativi. (da migliorare: aumentare pendenza; includere seminativo)
105_4	Parti basse di versante, per lo più concave, di raccordo con il fondovalle, o localmente a concavità in versante, a pendenza da debole a moderata (6-20%) con erosione idrica diffusa e deposizione moderata, su argille, argille siltose e depositi di versante con seminativi, vigneti e prati.
105_5	Versanti lineari e parti basse di versante, a debole pendenza, a morfologia rettilinea, erosione assente, a prevalenza di colture annuali.
105_6	Aree di scarpata, scoscese, a morfologia lineare, fortemente erose con incisioni e solchi, presenza di cespugli o vegetazione arborea degradata e rada.

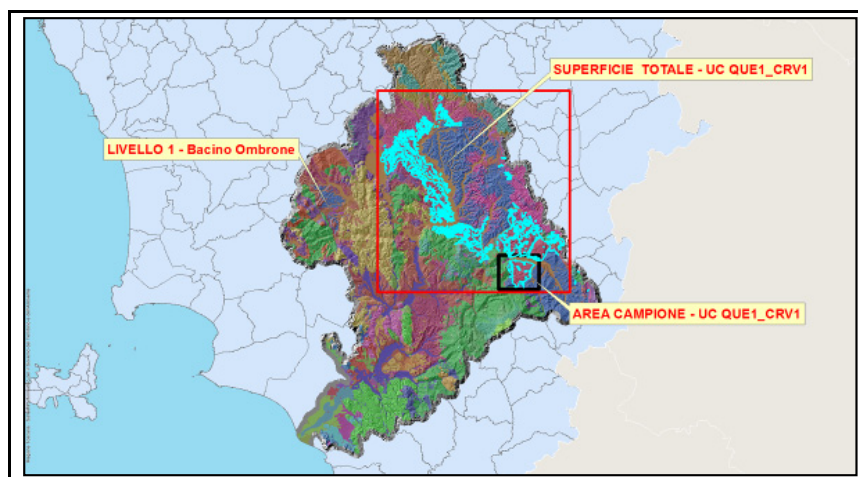


Figura 6 – Descrizione delle Unità di Paesaggio dell'UC QUE1_CRV1 la cui estensione è riportata nell'immagine in basso, con l'indicazione delle aree campione scelte.

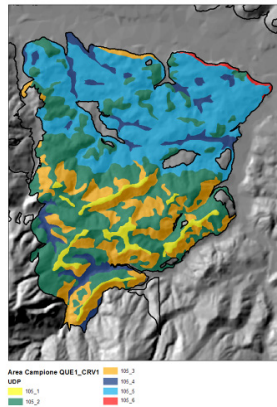


Figura 7 – Area Campione da fotointerpretazione dell'Unità Cartografica QUE1_CRV1.

Si riportano qui di seguito alcuni particolari del risultato delle elaborazioni semiautomatiche dell'UC QUE1_CRV1.

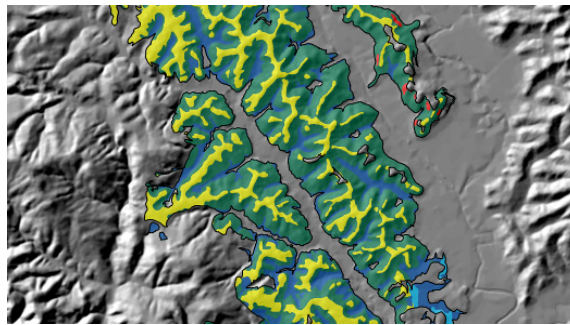


Figura 8 – Particolare spazializzazione semiautomatica.

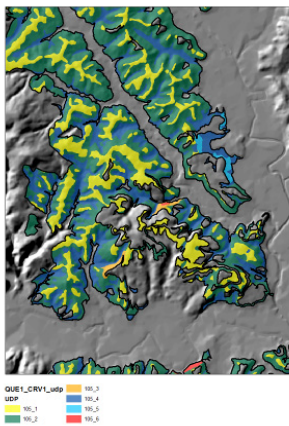


Figura 9 – Particolare spazializzazione semiautomatica.

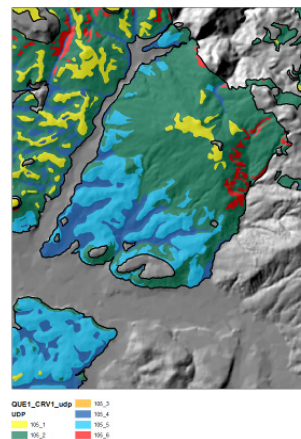


Figura 10 – Particolare spazializzazione semiautomatica.

Identificazione e digitalizzazione delle Unità di paesaggio sul territorio

I risultati ottenuti dall'attività sopra descritta sono stati di grande aiuto nella realizzazione dello strato delle udp per tutto il bacino dell'Ombrone; importanti sono stati anche i singoli indici morfometrici (in particolare la pendenza, la curvatura, l'accumulo di flusso, l'indice di umidità topografica, l'accumulo di radiazione solare, ecc.).

Al fine di suddividere l'intero territorio del Bacino dell'Ombrone in unità di paesaggio con la maggior probabilità di contenere suoli simili al loro interno e per garantire una più precisa elaborazione di dati e valutazione dei comportamenti del suolo per l'utilizzo di modelli nel campo della stima dell'erosione e della tutela idrogeologica, si è realizzato lo strato delle unità di paesaggio con una metodologia vicina alla metodologia classica basata sulla fotointerpretazione, utilizzando e valorizzando le elaborazioni morfometriche e la loro classificazione. Ciò ha consentito di interpretare il territorio in modo sempre ragionato considerando sempre tutte le informazioni territoriali che guidano l'apposizione dei limiti e sfruttando tutte le conoscenze a disposizione.

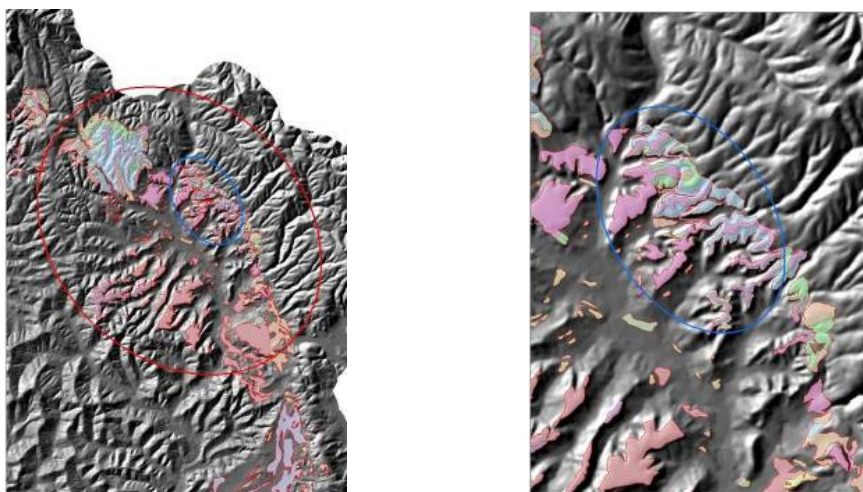


Figura 11– Cerchiato in rosso un sottosistema della carta dei suoli in scala 1: 250000; cerchiato in blu un insieme di unità di paesaggio individuate e delineate al suo interno.

Tutti gli indici morfometrici hanno costituito la base informativa che, assieme alle ortofoto, alle foto aeree e agli altri layer tematici, ha consentito di foto interpretare a video tutto il territorio del sottosistema preso in considerazione; nelle aree campione invece la foto interpretazione è avvenuta su foto aeree con visione stereoscopica.

Conclusioni

Alla luce delle attività effettuate possiamo fare le seguenti considerazioni: la spazializzazione per grandi unità, sparse eterogeneamente sul bacino dell'Ombrone, fornisce risultati sempre meno attendibili via via che ci si allontana dall'area campione foto interpretata; questo perché evidentemente i caratteri del territorio hanno una tale variabilità che occorrono molte più aree campione.

Inoltre quando i criteri di divisione delle varie unità di paesaggio fatte dal fotointerprete sono basate su elementi quali l'intensità di erosione, il pattern di drenaggio, l'uso del suolo, gli affioramenti rocciosi, eccetera, che sono ben riconoscibili in foto aerea, ma non caratterizzabili da alcun indice morfometrico, diventa molto difficile la loro spazializzazione utilizzando tecniche che invece su tali indici hanno la loro forza operativa. E' parso assai funzionale per meglio individuare le molteplici informazioni del paesaggio da esaminare, l'utilizzo dei vari prodotti intermedi, derivati

dall'elaborazione degli indici morfometrici (Slope, Plan curvature, Profile curvature, Flowaccumulation, Topographic Wetness Index) unitamente ad alcuni risultati più convincenti ottenuti dalle elaborazioni automatiche e semiautomatiche.

Tali prodotti forniscono indubbiamente al fotointerprete elementi utili a tracciare i limiti delle Unità di paesaggio in modo più speditivo e certamente più obiettivo. In definitiva si è valutato come, al momento, la delimitazione completamente automatizzata delle varie UDP, sebbene costituisca un metodo molto più rapido, comporti, in fase di validazione e revisione e soprattutto su ampie UC, un lavoro troppo oneroso in termini di tempo.

Riferimenti bibliografici

- Bloemen, W., 1980. *Calculation of hydraulic conductivities of soils from texture and organic matter content*. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.*, 43: 581-605.
- Borselli L., 1995. Soil Conservation Service Curve Number Method. In *Caratteristiche fisiche ed idrologiche del suolo*. CNR.
- Brakensiek, D.L., Rawls, W.J. e Stephenson, G.R., 1984. Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. *ASAE Paper No.PNR-84-302, St. Joseph, Michigan*.
- Campbell, G.S., 1985. *Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil-Plant Systems*. 150 pp., Elsevier, New York.
- Cosby, B.J., Homberger, G.M., Clapp, R.B. e Glinn, T.R., 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 20: 682-690.
- Calzolari C. et al., 2001. Metodi indiretti per la stima delle proprietà fisico idrologiche dei suoli. *Progetto SINA "Carta Pedologica in aree a rischio ambientale". Rapporto 9.1*
- Hengl, T., 2009. *A Practical Guide to Geostatistical Mapping. 2nd Edt. University of Amsterdam, www.lulu.com: 207-218*.
- Hengl, T. and Rossiter, D.G., 2003. Supervised landform classification to enhance and replace photo-interpretation in semi-detailed soil survey. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67(5): 1810-1822
- Hollis J. M., Thanigasalam P., Hallett S. H., Mayr T. R. and Jarvis N., 1995. *SEISMIC: User manual*, Soil Survey and Land Research Centre, Cranfield University, Silsoe, UK.
- Jaynes, D.B., and Tyler E.J., 1984. Using soil physical properties to estimate hydraulic conductivity. *Soil Sci.* 138:298-305
- MacMillan, R.A. and Pettapiece, W.W., 1997. Soil Landscape Models: Automated landscape characterization and generation of soil-landscape models. *Research Report No. 1E.1997*.
- Meyer, P.D., Gee, G.W., 1999. Information on Hydrologic Conceptual Models, Parameters, Uncertainty Analysis, and Data Sources for Dose Assessments at Decommissioning Sites. *Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-13091*.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek, K.E. Saxton. 1982. *Estimation of soil water properties*. *Trans. ASAE* 25:1316-1320.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S. e Papendick, R.I., 1986. Estimating generalised soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1031-1036.
- Schaap, M., Leij F.J., van Genuchten M.T., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251: 163-176.
- Scheinost A.C., Sinowski, W. E Auerswald, K., 1997a. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma*, 78: 129-143.
- Scheinost A.C., Sinowski, W. E Auerswald, K., 1997b. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, II. Comparison of regionalization procedures using a pedotransfer function. *Geoderma*, 78: 145-159.
- Simota, C. e Mayr, T., 1996. Pedotransfer function. In: Loveland, P.J. e Rounsevell, M.D.A. (Editors), *Agro-Climatic Change and European Soil Suitability (EuroACCESS)- A spatially distributed, soil, agro-climatic and soil hydrological model to predict the effects of climatic change*

- on land-use within the European Community. Commission of the European Communities, Directorate-General XII Science, Research and Development, pp. 234.*
- Soil Survey Division Staff, 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18
- Tietje O. and Tapkenhinrichs M., 1993. Evaluation of pedotransfer functions, *Soil Sci.Soc. Am. J.* 57: 1088-1095.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science* 148: 389-403.
- Vereecken H., Maes J., and Feyen J., 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties, *Soil Science* 149: 1-12.
- Wosten J. H. M., 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: Soil Quality for Crop Production and Ecosystem health. E G. Gregorich (ed.), *ELSEVIER*, Amsterdam.
- Wosten J. H. M., Lilly A., Nemes A., and Le Bas C., 1998. Using Existing Soil Data to Derive Hydraulic Parameters for Simulation Models in Environmental Studies and in Land Use Planning. Final Report on the European Union Funded Project, SC-DLO, Wageningen.
- Wosten J. H. M., Lilly A., Nemes A., and Le Bas C., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils, *Geoderma* 90: 169-185.
- Wosten J.H.M., Pachepsky Ya.A., Rawls W.J., 2001. Pedotransfer Function Bridging the gap between available basic soil data and missing hydraulic characteristic. *Journal of Hydrology* 251: 123-150.