

IRER - CNR-CSITE

CRITERI PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITA' DI MODELLI DIGITALI DEL TERRENO DERIVATI DA CURVE DI LIVELLO

RELAZIONE FINALE

Alberto Carrara

CNR-CSITE, Viale Risorgimento 2, Bologna
Tel.: 051-2093551; E-Mail: acarrara@deis.unibo.it

Bologna, Luglio 2001

IRER - CNR-CSITE

CRITERI PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITA' DI MODELLI DIGITALI DEL TERRENO DERIVATI DA CURVE DI LIVELLO

RELAZIONE FINALE

Alberto Carrara

CNR-CSITE, Viale Risorgimento 2, Bologna
Tel.: 051-2093551; E-Mail: acarrara@deis.unibo.it

1. PREMESSA

Nell'ambito del Progetto "*Studio per la costruzione del sistema informativo relativo all'inventario delle frane e dei dissesti in alcune aree del territorio regionale lombardo (codice IRER 2000C002)*" e' stato affidato allo scrivente l'incarico di:

- a) *fornire dei criteri, il piu' oggettivi possibile, per la valutazione della qualita' plano-altimetrica di modelli digitali del terreno (DTM) derivati dalle curve di livello riportate sulla carta tecnica della Regione Lombardia (CTR) a scala 1:10.000;*
- b) *applicare tali criteri per confrontare la qualita' di DTM, generati con metodi diversi, relativi a tre aree campione appartenenti ad un vasto comprensorio del territorio lombardo per il quale, sempre nell'ambito del citato progetto, e' in corso la produzione sistematica di un DTM, di tipo raster, da parte del CNR-IDPA (Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali) sotto il coordinamento del Dr. Bruno Testa;*
- c) *collaborare con il CNR-IDPA al fine di ottenere per detto comprensorio un modello digitale del terreno di qualita' la piu' elevata possibile, stante gli inevitabili errori insiti nelle curve di livello della CTR.*

Nel presente rapporto vengono prima illustrati i criteri qualitativi e quantitativi di valutazione di un DTM derivato dall'interpolazione o tassellazione delle curve di livello. Segue un'analisi comparata di tre metodi intesi alla generazione di DTM di tipo "*raster*" e *TIN*, ad elevata precisione plano-altimetrica. Tale analisi e' stata svolta sull'area di tre CTR campione relative al territorio lombardo per il quale, come ricordato, e' in corso la produzione di un DTM, di tipo raster con passo di campionamento pari a 20 m, da parte del CNR-IDPA.

2. METODI PER LA GENERAZIONE E VALUTAZIONE DI DTM

I recenti sviluppi della microelettronica e dell'informatica hanno profondamente influenzato i metodi volti tanto alla produzione della cartografia, quanto all'elaborazione ed analisi dei dati spaziali. Pertanto, nel corso del passato decennio si sono diffusi i sistemi informativi geografici (*Geographical Information Systems* o GIS), preposti all'acquisizione, gestione, aggiornamento, elaborazione, analisi e visualizzazione dei dati tradizionalmente rappresentati su carte topografiche o tematiche (Carrara, 1994; Giovannini et al., 1995; Carrara et al., 1996; Bitelli et al., 1996; Carrara et al., 1997).

Nell'ambito di tali tecnologie, hanno assunto particolare rilevanza quelle attinenti la generazione ed elaborazione dei modelli digitali del terreno (*Digital Terrain Models* o DTM), ove con tale termine si intende la rappresentazione numerica del rilievo, in forma tale da renderne possibile l'analisi automatizzata. Tale definizione implica quindi l'esistenza sia di un insieme, ordinato in vario modo, di quote relative a determinati punti della superficie terrestre, sia di moduli in grado quantomeno di interpolare agevolmente tali quote per ogni altro punto della medesima.

Vale precisare che, se da quasi un ventennio sono state messe in luce le potenzialità dei modelli digitali del terreno per la risoluzione di un ampio spettro di problemi di ordine geografico, geologico-geomorfologico e idrologico, solo di recente organismi pubblici o privati, preposti alla gestione del territorio, hanno manifestato un reale interesse per la produzione e l'applicazione su vasta scala dei DTM (Clarke et al., 1982; 1986; Carrara, 1988). Tale ritardo è riferibile al fatto che solo alla fine degli anni settanta la tecnologia elettronica ed informatica hanno fornito gli strumenti per acquisire/digitalizzare in forma semi-automatica i dati altimetrici, nonché per manipolarli in modo efficiente e rapido.

Attualmente esistono differenti tipi di modelli digitali, nonché diverse tecniche per la loro creazione ed impiego. Rimandando ad altra sede per una descrizione dettagliata dell'argomento (Carla' et al., 1987; Carrara, 1988; Carrara et al., 1988; Bitelli et al., 1993; Weibel e Heller, 1991; Carrara, 1994; Carrara et al., 1996), pare sufficiente qui ricordare che queste ultime differiscono sia per le procedure relative all'acquisizione dei dati, che per quelle volte alla gestione ed analisi dei medesimi. Di conseguenza, i problemi inerenti i DTM coprono due diversi, anche se interconnessi, aspetti:

- a) *l'acquisizione dei dati*
- b) *l'elaborazione-analisi degli stessi.*

Relativamente al primo aspetto, va premesso come l'acquisizione dei dati abbia sempre rappresentato la fase più lunga e costosa dell'intera operazione. Ciò è vero indipendentemente dal modo secondo cui i dati siano acquisiti e digitalizzati.

In generale, le quote sono ottenute o da basi topografiche esistenti, o da aerofotogrammi, o direttamente dal terreno.

Attualmente, la maggior parte dei DTM relativi a vaste estensioni geografiche è ottenuta a partire dalle curve di livello digitalizzate di basi topografiche esistenti. È ovvio che questo approccio incorpora un doppio ordine di errori: il primo riguardante la fase di restituzione delle isoipse dalla

stereo-coppia, il secondo connesso alla fase di interpolazione delle medesime per il calcolo del modello di quote.

La diffusione del medesimo scaturisce quindi principalmente da considerazioni economiche e funzionali. Nei paesi occidentali sono generalmente disponibili cartografie topografiche recenti e a grande scala, la cui realizzazione ha comportato ingenti investimenti. Grazie alla tecnologia degli scanner elettronici, la conversione digitale delle isoipse puo' essere effettuata in modo sufficientemente agevole.

Una procedura piu' accurata comporta la determinazione del modello altimetrico direttamente dalla stereo-coppia, durante la fase di foto-restituzione. Tuttavia, fino a tempi recenti, questa tecnica e' risultata sostanzialmente impraticabile a causa dei costi estremamente elevati richiesti dall'impiego del tradizionale stereoscopio analitico.

Come discusso altrove (Bitelli et al., 1996), i recenti sviluppi (hardware e software) nel settore, permettono di affermare che in un prossimo futuro la fotogrammetria digitale diventera' il principale metodo per la produzione di DTM su vasta scala.

Infine, i DTM ottenuti da sensori aerei innovativi (esempio, LASER-SCAN), hanno trovato e troveranno crescente applicazione soprattutto in progetti speciali riguardanti aree poco estese.

Per quanto riguarda le tecniche comportanti l'impiego di documenti cartografici, va ricordato che la procedura piu' comune per l'acquisizione dei dati richiede la digitalizzazione/vettorizzazione, tramite scanner elettronici, delle isoipse e la codifica delle stesse a mezzo di operazioni interattive o semi-automatiche.

Va altresì rilevato come a tutt'oggi non esista un accordo generale sul modello spaziale secondo cui devono essere campionate le quote (curve di livello, profili, a griglia, ecc.), ne' sulla densita' ottimale di campionamento delle stesse.

Circa il primo problema, sara' sufficiente ricordare che i modelli a griglia (*raster*) presentano, al contempo, il grande vantaggio di poter essere agevolmente elaborati e lo svantaggio di una sensibile ridondanza nei dati.

Per quanto concerne la *densita'*, se ne sottolinea la particolare importanza per i modelli a griglia, nei quali e' necessario predeterminare la dimensione della cella in una fase iniziale del progetto. Come piu' oltre discusso, esperienze maturate in precedenza (Carrara et al., 1978) e sperimentazioni effettuate di recente (Carrara et al., 1988; Bitelli et al., 1993) concordano sulla opportunita' di impiegare griglie con lato compreso tra 20 e 30 m, qualora l'input sia costituito da carte topografiche a scala 1:25.000, mentre passi di campionamento dell'ordine di 10-20 m sono compatibili con basi topografiche di maggior dettaglio (scala 1:10.000).

Venendo quindi alla gestione-elaborazione dei modelli digitali, e' forse superfluo ricordare che una grande varieta' di tecniche e metodi volti alla manipolazione dei dati sono stati proposti o impiegati dagli autori. Tuttavia, tutti i modelli dei dati altimetrici, al pari di quelli preposti all'elaborazione degli altri dati territoriali, sono riconducibili a due strutture spaziali fondamentali (Carrara et al., 1996):

- a griglia (cellulare o “raster”)
- a triangoli irregolari (“triangulated irregular network” o TIN).

Ciascuna delle due è caratterizzata da pregi e difetti dibattuti nella letteratura specialistica (Burrough, 1986; Palacios-Velez & Cuevas-Renaud, 1986; Bitelli et al., 1993; Weibel e Heller, 1991; Carrara, 1994). Per i modelli raster, sarà sufficiente ricordare che possono -a) essere agevolmente elaborati da qualsiasi algoritmo per la produzione di mappe derivate o per la costruzione di modelli (idrologici, morfologici, ecc.); -b) essere facilmente integrati con altre tipologie di dati (cartografici o telerilevati) tramite semplici operazioni matriciali.

Le principali limitazioni di questo approccio, peraltro ben note in letteratura, riguardano: -a) l’elevata ridondanza dei dati, per aree a rilievo uniforme; -b) l’anisotropia dell’informazione altimetrica legata al fatto che nello spazio geografico le direzioni parallele alle colonne (generalmente N-S), alle righe (generalmente E-W) e alle diagonali della matrice di quote sono *privilegiate* rispetto a tutte le altre.

Per i modelli TIN, pregi e difetti sono tuttora oggetto di dibattito fra gli specialisti, vale tuttavia ricordare che: -a) possono rappresentare qualsiasi tipo di superficie senza incorrere in ridondanze dei dati; -b) permettono di incorporare nel modello altimetrico informazioni ausiliarie, quali linee di impluvio o displuvio, discontinuità strutturali, ecc.; -c) facilitano la piena integrazione geometrica e topologica del dato altimetrico in database vettoriali.

I limiti di questo approccio riguardano: -a) la complessità algoritmica per la costruzione di un TIN con la precisione richiesta da molte applicazioni; -b) la difficoltà operativa di automatizzare le operazioni di integrazione di dati ausiliari nel TIN; -c) la scarsità sul mercato di moduli TIN realmente efficienti e flessibili.

Se la letteratura specialistica tratta estesamente l’argomento di cui sopra, pochi sono invece i contributi intesi a valutare la *qualità* di un modello numerico a mezzo delle tecniche di elaborazione delle immagini (Wood e Fisher, 1993), o tramite il confronto con i dati originari (Bitelli et al., 1996).

Da ultimo, si precisa che nella presente relazione, si farà riferimento alle procedure che generano DTM raster e a quelle che, dopo aver prodotto una struttura TIN, ne estraggono un raster di quote. In questo secondo caso, l’informazione altimetrica risulterà in qualche misura degradata dal *doppio* passaggio di struttura.

3. CRITERI DI VALUTAZIONE DI UN DTM

Numerosi e talora contrastanti sono i criteri per valutare la qualità di un DTM. Questi possono essere raggruppati in due categorie principali: alla prima, definibile *di confronto*, appartengono tutte quelle operazioni miranti a confrontare il DTM con le curve di livello originali. Ovviamente, tali operazioni saranno possibili solamente in presenza dei dati di input. Nella seconda, definibile *di verosimiglianza*, ricadono quei test che intendono stimare la qualità della distribuzione spaziali del DTM indipendentemente dall'informazione sulle isoipse. Tanto alla prima quanto alla seconda categoria appartengono test statistici e grafici.

Fra i criteri statistici, si ricorda la radice quadrata dell'errore medio quadratico, l'asimmetria o la kurtosi della distribuzione altimetrica. In generale, tali indici non sono particolarmente efficaci in quanto sintetizzano l'andamento generale dell'insieme dei dati senza incorporare la variabilità spaziale degli stessi.

Altri approcci utilizzano tecniche di visualizzazione (*rendering*) che, se impiegate da esperti, forniscono utili indicazioni sulla fedeltà o verosimiglianza del modello altimetrico. Fra queste, vanno ricordate le rappresentazioni prospettiche della quota, i *shaded-relief*, e la visualizzazione delle derivate della quota quali la pendenza, l'esposizione o le curvature.

Nel presente studio, sono stati individuati alcuni semplici criteri di *confronto* tra dati del DTM e andamento delle curve di livello; gli uni quantitativi, gli altri di tipo grafico; ambedue, sebbene in qualche misura utilizzabili solo da un esperto, forniscono comunque un'informazione utile per il confronto tra DTM diversi, relativi alla stessa area. Ovviamente, tali criteri saranno pienamente applicabili solo a modelli con densità di campionamento congruente alla scala della cartografia d'ingresso.

Le condizioni che un DTM di alta qualità deve soddisfare possono essere riassunte nel modo seguente (Carrara, 1994; Carrara et al., 1996, 1997):

- i. in corrispondenza delle curve di livello originali, i valori del DTM devono coincidere (o discostarsi di un valore inferiore al 5% dell'equidistanza) con la quota delle medesime***
- ii. nello spazio compreso tra ogni coppia di isoipse, i valori del DTM devono quantomeno ricadere nell'intervallo altimetrico definito dalla coppia;***
- iii. sempre nello spazio di cui sopra, i valori del DTM devono variare linearmente tra le quote della coppia;***
- iv. in aree a bassa informazione altimetrica, quali ampie spianate vallive o dossi estesi, i valori del DTM devono riflettere in modo verosimile la probabile conformazione morfologica delle medesime;***
- v. distribuzioni di quote del DTM che definiscono conformazioni morfologiche irrealistiche (artefatti) devono essere limitate a meno dello 0.1-0.2% dei dati.***

Le prime tre condizioni si basano sulla semplice assunzione che, poiché in molte circostanze l'unica informazione di input è costituita dalla quota delle

isoipse digitali, il DTM, derivato da tali curve, dovrà riprodurle con sufficiente accuratezza, a meno, cioè, della incertezza spaziale dovuta alla dimensione della cella del raster (20x20 m nel caso in esame).

Circa la linearità delle quote interpolate tra ogni coppia di isoipse, tale criterio è indubbiamente molto conservativo e talora anche errato; in natura, infatti, i versanti sono più frequentemente convessi o concavi che rettilinei. Tuttavia, in mancanza di informazione aggiuntiva, l'unica assunzione che può essere formulata è di tipo lineare.

La quarta condizione è la più difficile da quantificare: si tratta infatti di stabilire la verosimiglianza di una conformazione altimetrica rispetto ad un assetto morfologico che può essere solo ipotizzato dall'osservatore.

L'ultimo criterio è apparentemente il più semplice; tuttavia, se alcuni artefatti sono vistosamente riconoscibili tramite le più comuni tecniche di *rendering*, altri richiedono un esame assai più attento a mezzo di opportuni strumenti grafici o statistici. Ad esempio, la presenza di possibili artefatti è ottenibile sia calcolando curve di livello con valori intermedi tra quelli delle isoipse originali, sia costruendo classi colorimetriche di pari intervallo. La stessa procedura è quindi applicabile alle derivate della quota quali la pendenza e l'esposizione, quest'ultima particolarmente sensibile ad errori casuali o sistematici del modello altimetrico.

Naturalmente, i citati criteri di valutazione di un DTM, partono dall'assunzione che le quote delle isoipse e la geometria delle stesse siano prive di errore. Tale assunzione in molti casi è largamente errata, ma, senza altre informazioni, non è generalmente né verificabile, né modificabile.

3.2. Procedure per la generazione di DTM

Molteplici procedure di generazione di DTM raster sono state sviluppate e implementate (Yoeli, 1975; Leberl & Olson, 1982; Clarke et al., 1982; Burrough, 1986; Wood & Fisher, 1993). Molte di queste sono state incorporate in moduli GIS distribuiti sul mercato (ILWIS, IDRISI, GRASS, SPANS, ecc.), altre costituiscono moduli indipendenti e specifici. Con l'eccezione dei GIS vettoriali ARC/INFO e MGE, che producono modelli altimetrici a struttura sia TIN che raster, tutti gli altri operano in ambiente raster.

Nella costruzione di un DTM raster assume particolare rilevanza la procedura utilizzata per interpolare le quote. Numerose tecniche di interpolazione sono state proposte allo scopo (cfr. Clarke et al., 1982): alcune rivestono carattere generale (medie mobili, splines, polinomiali, ecc.) in quanto considerano i dati come un insieme di osservazioni puntuali distribuite casualmente nello spazio geografico; altre invece tengono conto in varia misura delle proprietà topologiche e morfologiche delle curve di livello e sono quindi "orientate" specificatamente al problema. Fra queste ultime, le due più comunemente usate sono la "*weighted mean*" (cfr. Yoeli, 1975) e lo "*steepest slope*" (cfr. Leberl & Olson, 1982). Ognuna di tali procedure, spesso implementate dagli autori con varianti più o meno significative, presenta vantaggi e svantaggi in termini di efficienza e accuratezza.

Va tuttavia sottolineato che in letteratura scarse appaiono le analisi di qualità dei risultati forniti dai diversi metodi di calcolo dei DTM.

I modelli digitali del terreno di tipo raster, con passo di campionamento pari a 20 m, delle tre aree campione forniti da CNR-IDPA sono stati realizzati con i seguenti metodi di interpolazione o tassellazione, per comodità, qui definiti come:

Metodo A: generatore di DTM di tipo TIN, implementato nel GIS **Arc/Info** (ver. 8.0), realizzato da ESRI (USA).

Metodo B: generatore di DTM di tipo raster (*topogrid*), implementato nel GIS **Arc/Info** (ver. 8.0), realizzato dall'ESRI (USA).

Metodo C: generatore di DTM di tipo TIN (*terrain modeler*), implementato nel GIS **MGE** (ver. 5.1), realizzato da Intergraph (USA).

Si precisa che tali algoritmi sono di facile reperibilità sul mercato e hanno trovato ampia applicazione tanto in ambiente di ricerca che di sviluppo.

Di seguito viene brevemente illustrata la logica secondo cui detti algoritmi operano; mentre per maggiori dettagli, si rimanda alla letteratura sull'argomento (Carla' et al., 1987; Carrara, 1988; Hutchinson, 1989; ESRI, 1991; Bitelli et al., 1993).

La procedura **A** effettua, a partire dalle curve di livello vettoriali e da eventuali punti quotati, una tassellazione dello spazio cartografico secondo la triangolazione di Delaunay.

La procedura **B** usa una tecnica di interpolazione *spline* iterativa basata su differenze finite che unisce (o dovrebbe unire) i vantaggi degli interpolatori "locali" (esempio, media pesata per l'inverso della distanza) a quelli degli interpolatori globali (esempio, kriging).

Il metodo **C** produce inizialmente un TIN a partire dalle curve di livello, sempre secondo la triangolazione di Delaunay; successivamente, il modulo inserisce nel modello punti quotati appartenenti a linee di impluvio e displuvio, generate automaticamente dal medesimo, e quindi ricalcola l'intero TIN sulla scorta anche di tali informazioni aggiuntive (Tang, 1992).

Alcuni dei metodi sopra elencati (**A** e **C**) sostanzialmente non comportano il "setting" di parametri per il controllo delle caratteristiche del DTM da generare; il metodo **B** invece richiede l'ottimizzazione di due o più parametri; nell'uno e nell'altro caso, la qualità finale del DTM dipenderà, oltre che dall'efficienza dell'algoritmo, dalle caratteristiche dei dati di input (congruenza geometrica e topologica delle isoipse) e dalla loro organizzazione (in particolare dalla dimensione della cella di rasterizzazione delle curve di livello di ingresso).

Poiché il DTM da fornire è di tipo raster, i modelli a triangoli irregolari (metodi **A** e **C**) sono stati convertiti in un *lattice*, con passo di campionamento pari a 20 m, attraverso algoritmi comportanti operazioni di semplice interpolazione bilineare.

4. ANALISI COMPARATA DEI TRE METODI PER LA GENERAZIONE DI DTM

4.1. Aree campione

Al fine di valutare i pregi e i difetti di ciascun metodo, sono state scelte dalla Regione Lombardia ed il CNR-IDPA, tre aree campione (di seguito anche definite: **test_1** o **Chiavenna** (o **b2d3**), **test_2** o **Chiuro** (o **c3e2**) e **test_3** o **Toscolano Maderno** (o **e5a3**), ciascuna corrispondente ad un elemento (circa 40 km²) della cartografia regionale (Fig. 1).

Per ciascuna area test sono stati quindi forniti allo scrivente dal CNR-XXX:

- *i tre DTM, con risoluzione pari a 20x20 m, ottenuti con i metodi sopra ricordati;*
- *i vettori corrispondenti alle isoipse direttrici (100 e 50 m) e a quelle dei 30 e 80 m, integrate da curve intermedie per le aree a basso gradiente quali i fondovalle;*
- *i punti quotati;*
- *la rete drenante;*
- *l'immagine raster del CTR.*

Nella scelta di dette aree test, si e' cercato di ottenere sia campioni rappresentativi della grande varieta' e complessita' orografica del territorio montano lombardo, sia situazioni morfologiche che, sulla base di studi precedenti, risultassero di difficile elaborazione da parte della maggior parte degli algoritmi interpolatori, noti in letteratura.

In particolare, la prima area (b2d3) e' caratterizzata da una una porzione a basso gradiente longitudinale (Valle del T. Liro) e pendici estremamente acclivi (40-60°). Tale configurazione morfologica richiede l'impiego di un algoritmo in grado di interpolare correttamente/verosimilmente in condizioni di scarsa/insufficiente informazione (il fondo valle), da un lato, e di alta/eccessiva informazione altimetrica (i versanti), dall'altro.

Nella seconda area, tale diversita' morfologica risulta ancora piu' accentuata: la morfologia dell'ampia valle dell'Adda, sostanzialmente pianeggiante, contrasta nettamente con quella delle pendici circostanti caratterizzate da pendenze estremamente elevate. L'area in questione e' anche caratterizzata dalla presenza, in localita' Ronco, di un ampio conoide la cui morfologia (peraltro sufficientemente semplice) dovrebbe essere fedelmente espressa dal DTM.

Nella terza area, posta in prossimita' del Lago di Como, sono presenti fondi valle stretti e sinuosi, la cui geometria longitudinale e trasversale risulta di difficile ricostruzione da parte di ogni algoritmo interpolatore.

Infine, si precisa che allo scopo di evitare eventuali "effetti di bordo" sui modelli altimetrici, e' stata esclusa dall'analisi la superficie (pari a circa il 10% dell'area) prossima al bordo di ciascun elemento cartografico.

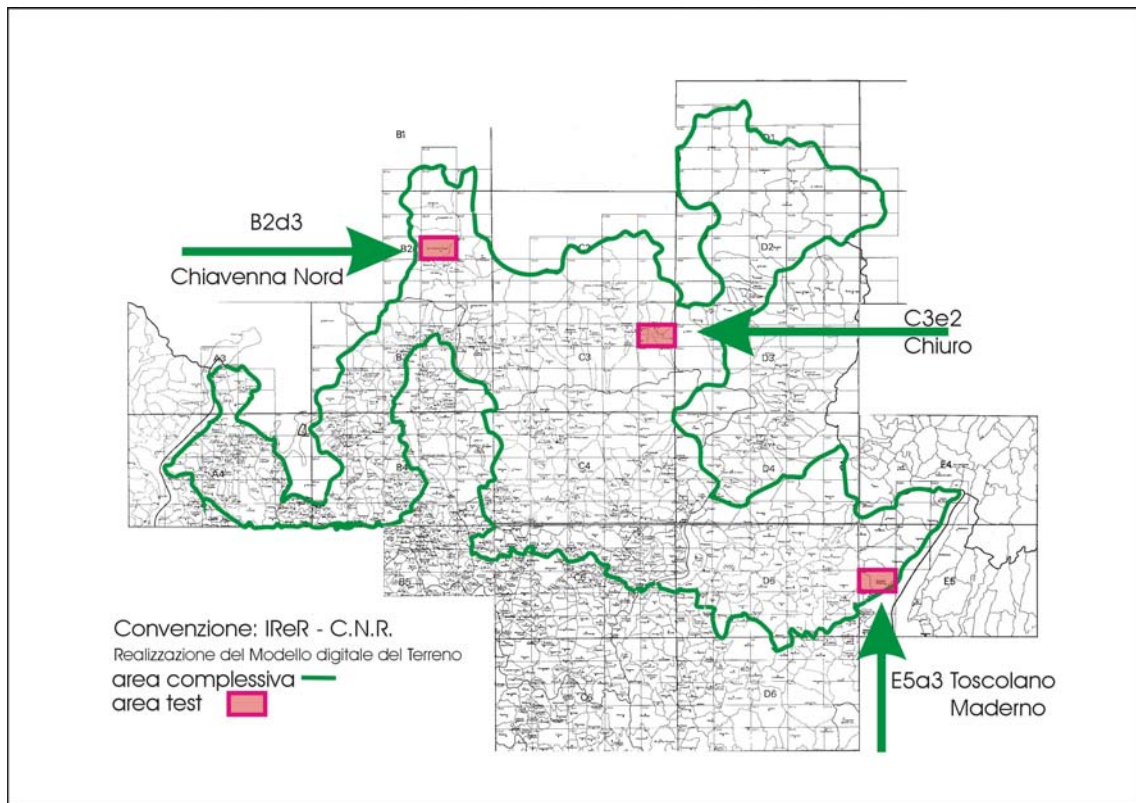


Fig. 1. Localizzazione delle tre aree campione.

4.2. Modelli digitali del terreno

Per ogni area campione sono stati prodotti tre DTM utilizzando i tre algoritmi sopra ricordati. Tutti i nove modelli, espressi in metri, sono stati calcolati come reali. Tale scelta ovviamente non implica che i dati abbiano una precisione superiore al metro, ma piu' semplicemente intende favorire il *rendering* di aree molte estese a quota pressoché costante.

Tutti i DTM hanno una densita' di campionamento pari a 20x20 m e tutti sono stati georeferenziati utilizzando lo stesso sistema di riferimento (Gauss-Boaga).

I DTM prodotti con il modulo TIN di Arc/Info (metodo **A**) sono stati ottenuti utilizzando una densita' massima dei vertici di ogni curva pari a 5 m e una distanza minima tra i nodi dei triangoli pari a 0.01 m. Come ricordato, il modello altimetrico a triangoli irregolari cosi' ottenuto e' stato quindi convertito in un DTM raster (*lattice*).

I DTM prodotti con il modulo Topogrid di Arc/Info (metodo **B**) sono stati ottenuti utilizzando i seguenti parametri: *datatype = contour, enforce = off, Tol1 = 1, Horiz_SE = 1, Vert_SE = 0 e Max iterations = 100*. Poiche' l'algoritmo in questione genera un modello raster, nessuna ulteriore trasformazione e' stata necessaria.

I DTM ottenuti con il modulo TIN di MGE (metodo **C**) sono stati realizzati utilizzando una densita' *minima* dei vertici di ogni curva ed una distanza *minima* tra i nodi dei triangoli pari a quella fornita dal dato di input (di poco inferiore ai 3 m). Anche in questo caso, il modello altimetrico a triangoli irregolari e' stato quindi convertito in un DTM raster (*lattice*).

4.3. Area test 1

Per la prima area di studio (Chiavenna) il primo test ha riguardato la verifica di congruenza di ogni DTM rispetto ai primi tre criteri di qualita' sopra elencati.

A tale scopo, e' stata scelta una sottozona, di circa 2 km², che riflette una semplice conformazione morfologica: un letto fluviale a moderato gradiente longitudinale delimitato da versanti acclivi. I dati di ogni DTM sono stati quindi raggruppati in classi i cui limiti corrispondono ai valori altimetrici delle isoipse e alle prime e' stata assegnata una sequenza di colori (dal rosso al giallo) per i quattro intervalli di quota ricadenti fra ogni coppia di isoipse dei 100 m (Fig. 2, 3 e 4). Successivamente, alle quote dei DTM, arrotondate al metro, e' stata assegnata una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti (Fig. 5, 6 e 7).

Si premette che dove la pendenza del versante e' elevata (porzione nord-orientale dell'area in esame) l'imprecisione legata alla dimensione della cella del raster (20x20 m) non permette di effettuare alcuna reale valutazione della qualita' del modello. Limitando quindi l'analisi alle aree a pendenza moderata, l'esame visivo di dette immagini rivela chiaramente che l'algoritmo **C** soddisfa in larga misura i primi tre criteri di qualita': i limiti delle classi colorimetriche del DTM coincidono con l'andamento delle curve di livello e, all'interno di ogni coppia di curve, tutte le classi da un metro sono egualmente rappresentate (Fig. 4 e 7). Il DTM ottenuto con il metodo **B** offre risultati sufficientemente soddisfacenti in relazione tanto ai primi due criteri di qualita' quanto al terzo. Tuttavia, in corrispondenza di dossi o valli stretti e sinuosi, non poche incongruenze sono riscontrabili (Fig. 3 e 6). Da ultimo, il DTM ottenuto con il metodo **A** fornisce una risposta largamente inadeguata. Lungo il corso del torrente principale, i limiti delle classi di quota del DTM non seguono l'andamento delle corrispondenti curve di livello (Fig. 2). Inoltre, l'algoritmo tende a produrre, perpendicolarmente alle isoipse, profili marcatamente convessi come attestato dal fatto le celle a colore giallo prevalgono su quelle contrassegnate dalle altre tonalita' di colore.

Un'ispezione piu' attenta delle immagini suggerisce che tutti i metodi concentrano i valori interpolati nelle classi corrispondenti alla quota delle isoipse. Come piu' oltre discusso, il problema, comune alla maggior parte dei generatori di DTM, non e' nuovo, ne' di facile spiegazione (cf. Carrara et al., 1996, 1997).

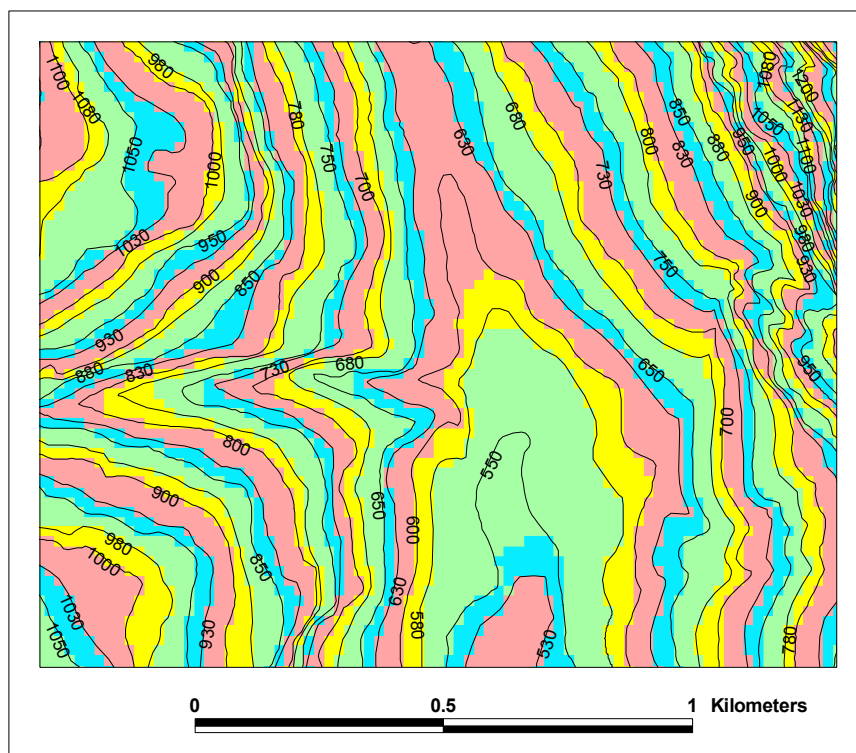


Fig. 2. Porzione dell'area test_1 (Chiavenna). Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **A** i cui i valori altimetrici sono stati raggruppati in classi con limiti corrispondenti ai valori di quota delle isoipse.

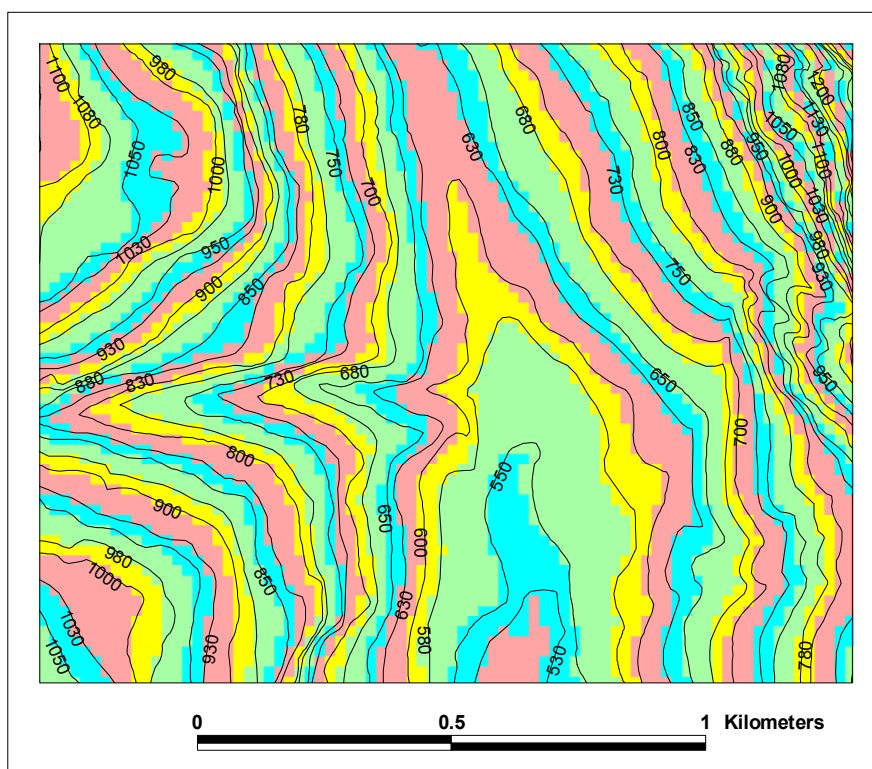


Fig. 3. Porzione dell'area test_1 (Chiavenna). Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **B** i cui i valori altimetrici sono stati raggruppati in classi con limiti corrispondenti ai valori di quota delle isoipse.

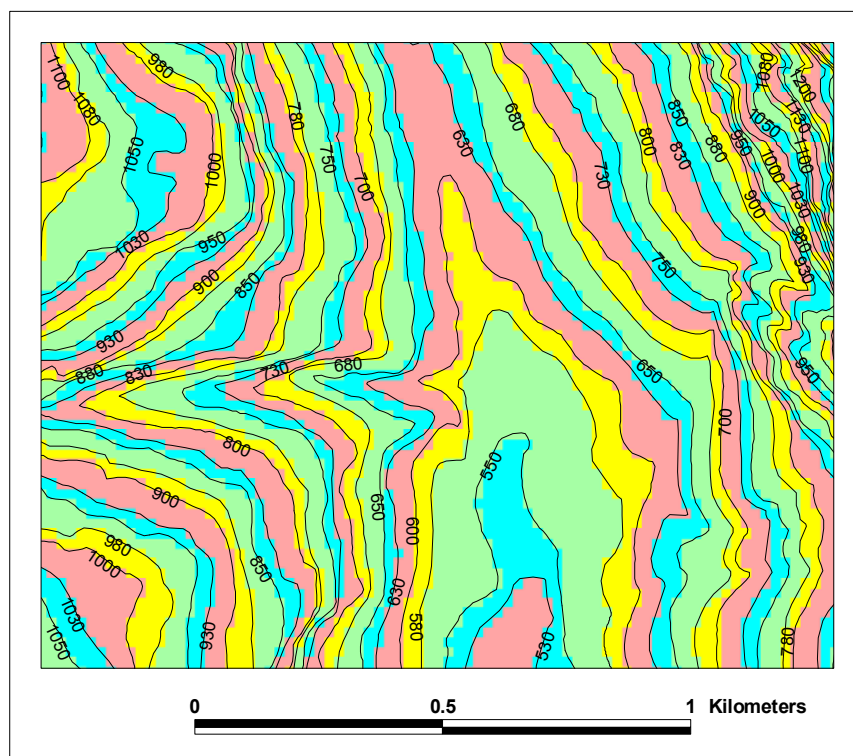


Fig. 4. Porzione dell'area test_1 (Chiavenna). Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **C** i cui i valori altimetrici sono stati raggruppati in classi con limiti corrispondenti ai valori di quota delle isoipse.

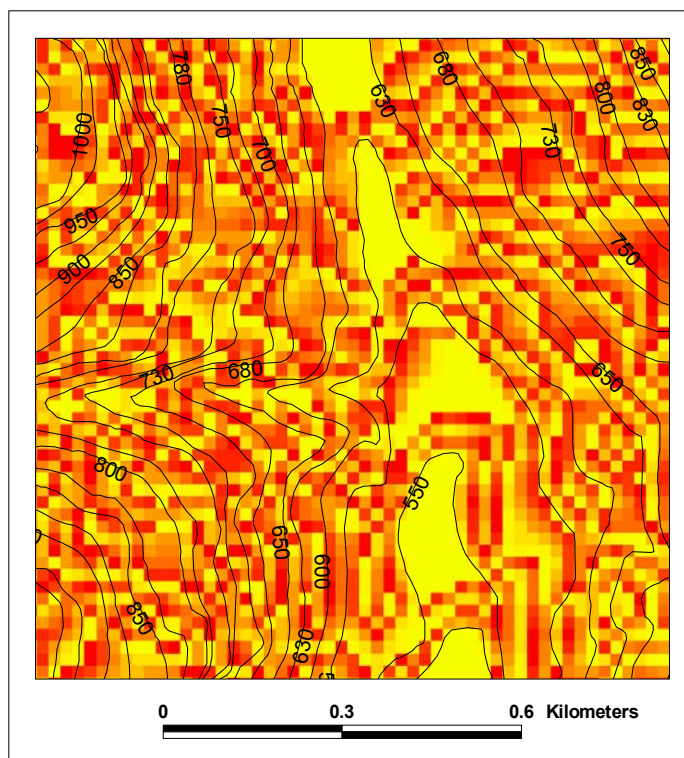


Fig. 5. Porzione dell'area test_1. Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **A** i cui i valori altimetrici sono stati arrotondati al metro ed espressi da una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti.

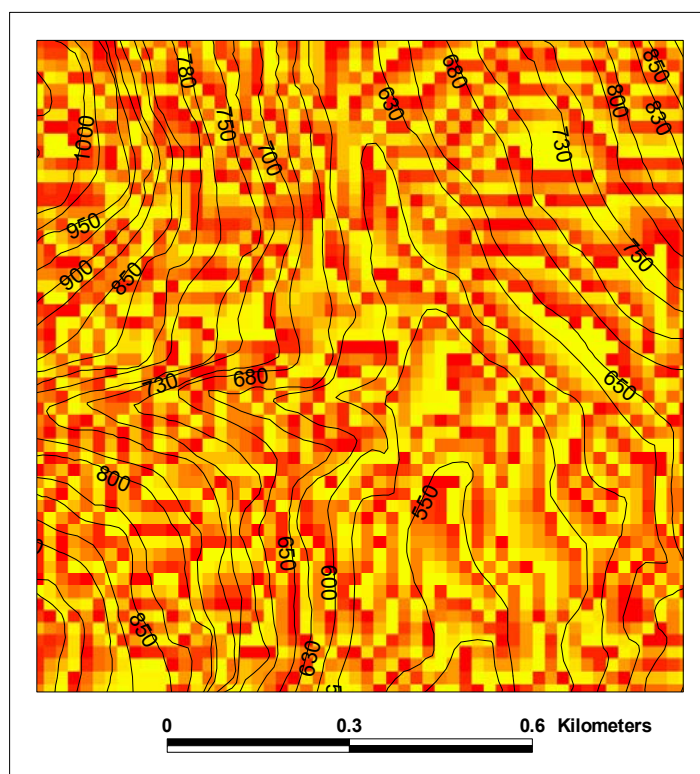


Fig. 6. Porzione dell'area test_1. Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **B** i cui i valori altimetrici sono stati arrotondati al metro ed espressi da una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti.

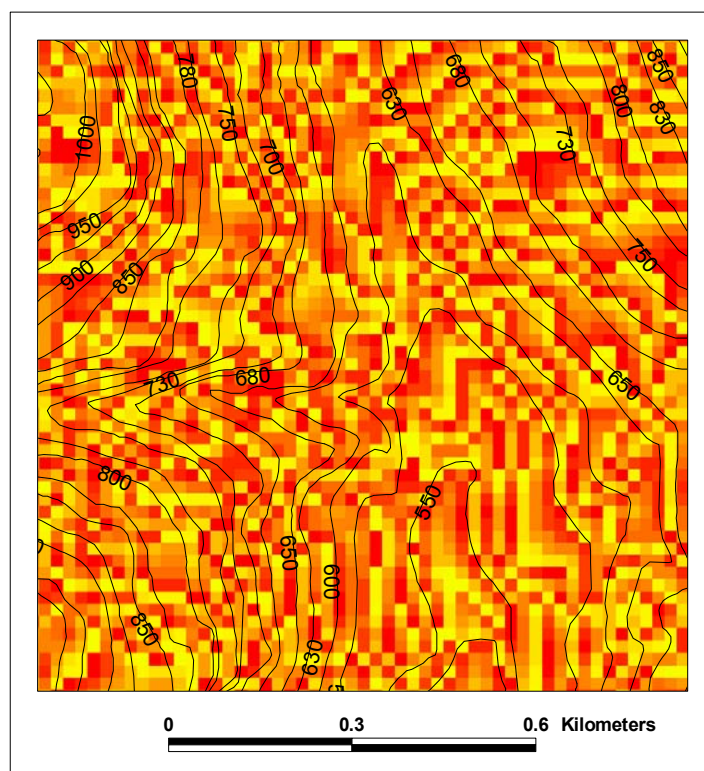


Fig. 7. Porzione dell'area test_1. Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **C** cui i valori altimetrici sono stati arrotondati al metro ed espressi da una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti.

Venendo agli ultimi due criteri di qualità, l'area in esame non presenta situazioni morfologiche di complessità tale da dare luogo a vistosi e diffusi artefatti. Tuttavia, l'esame visivo delle immagini dei tre DTM, con valori sempre arrotondati al metro, evidenzia nel DTM del metodo A profili longitudinali irrealistici lungo i principali corsi d'acqua, nonché nell'area pianeggiante situata nella porzione nord-orientale dell'immagine (Fig. 8).

Le osservazioni sopra riportate si basano sull'esame visivo dei DTM i cui valori sono stati riclassificati ed associati ad opportune scale cromatiche. Si pone quindi l'esigenza di fornire delle valutazioni di congruenza dei tre DTM ai criteri di qualità in forma maggiormente quantitativa e quindi meglio utilizzabili anche da parte di tecnici con limitata esperienza nel campo.

Si è quindi proceduto ad effettuare un test statistico sulla frequenza dei valori di quota interpolati tra ogni coppia di isoipse (*terzo* criterio di qualità). A tal fine, le quote di ogni DTM sono state ricodificate come *distanze verticali* dalla coppia di isoipse dei 100 m. In altre parole, i valori di quota compresi, per esempio, tra 500 e 600 m sono stati riclassificati come 0 (500), 1 (501), 2 (502), ... , e 99 (599). Sotto l'ipotesi di una interpolazione lineare delle quote tra ogni coppia di isoipse, la distribuzione di frequenza di detti valori dovrà essere di tipo *rettangolare*. Eventuali scostamenti da tale distribuzione attesteranno un cattivo funzionamento dell'algoritmo interpolatore (Reichenbach et al., 1993; Carrara et al., 1996, 1997).

Dall'esame degli istogrammi di Fig. 11, risulta che i metodi **A** e **B** producono istogrammi con frequenze elevate coincidenti esattamente ai codici 0, 30, 50 e 80, cioè alle quote delle curve di livello. In particolare, nel DTM del metodo **A** la frequenza di tali quote è sistematicamente doppia rispetto a quella di ogni altro valore altimetrico, mentre nel DTM del metodo **B** le frequenze più elevate coincidono o sono prossime ai valori di quota delle curve di livello. Solo il metodo **C** fornisce una distribuzione di frequenza di forma quasi rettangolare.

Pertanto, i modelli altimetrici **A** e **B** non sono conformi ai criteri enunciati ai punti *iii*), *iv*) e *v*). Questi modelli altimetrici forniscono un'irrealistica rappresentazione del paesaggio, caratterizzata da aree pianeggianti in corrispondenza di ogni isoipsa e pendici variamente acclivi nell'interspazio tra le medesime.

Da sperimentazioni effettuate, è emerso che il fenomeno è imputabile a diversi fattori. Il primo si riferisce alla dimensione del *pixel* utilizzato per la *rasterizzazione* delle isoipse: al crescere della sua dimensione, aumenta proporzionalmente il numero di punti del DTM con valore uguale a quello delle isoipse; ciò vale per tutti gli algoritmi interpolatori e segnatamente per il **B**. Il secondo fattore riguarda la logica stessa dell'interpolatore: il metodo **A**, che opera per tassellazione dello spazio secondo la triangolazione di Delaunay, tende ad effettuare un filtraggio dei dati, filtraggio che porta, come inevitabile effetto collaterale, ad un addensamento delle quote calcolate in corrispondenza dei valori delle isoipse. La buona risposta del TIN del metodo **C** è invece da imputarsi all'impiego di punti aggiuntivi ("*inferred*") nella fase di costruzione finale del modello triangolare.

In conclusione, sulla base delle osservazioni sopra descritte, i metodi che forniscono i risultati migliori sono, nell'ordine, **C**, **B** ed **A**.

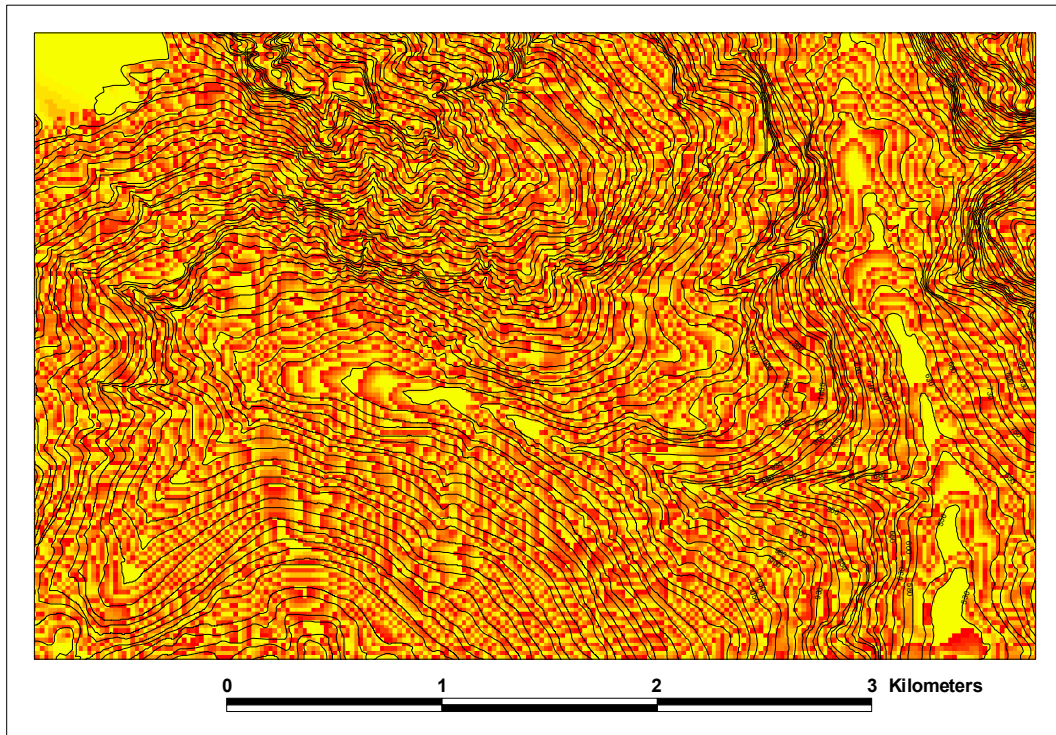


Fig. 8. Porzione dell'area test_1. Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **A** i cui i valori altimetrici sono stati arrotondati al metro ed espressi da una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti.

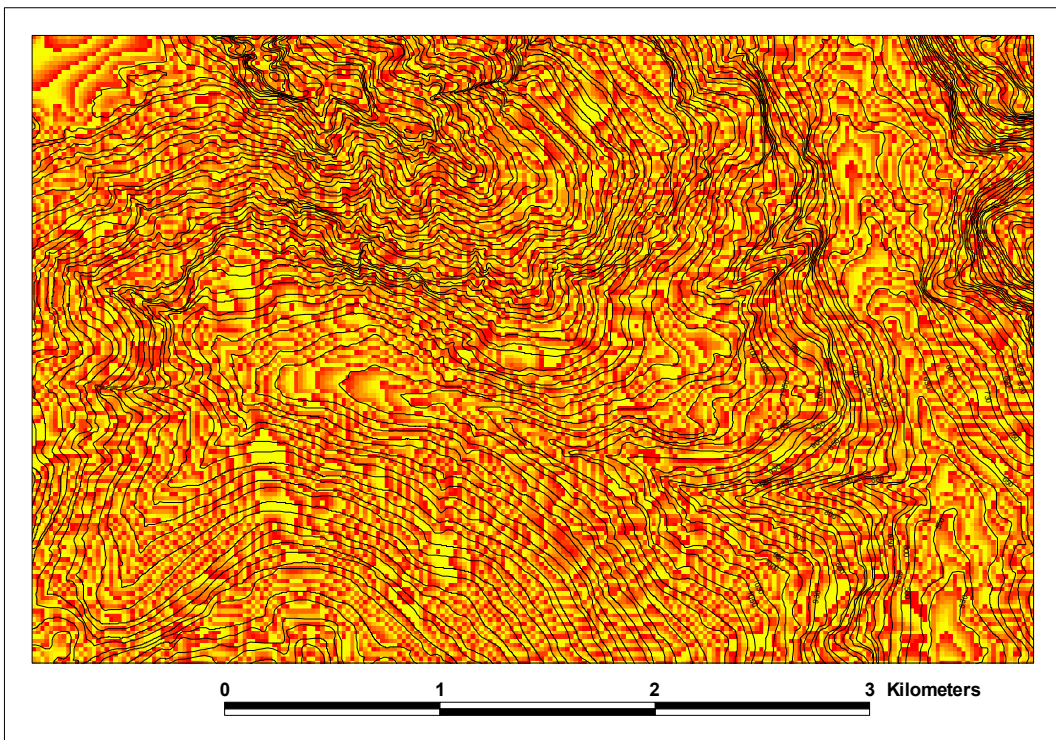


Fig. 9. Porzione dell'area test_1. Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **B** i cui i valori altimetrici sono stati arrotondati al metro ed espressi da una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti.

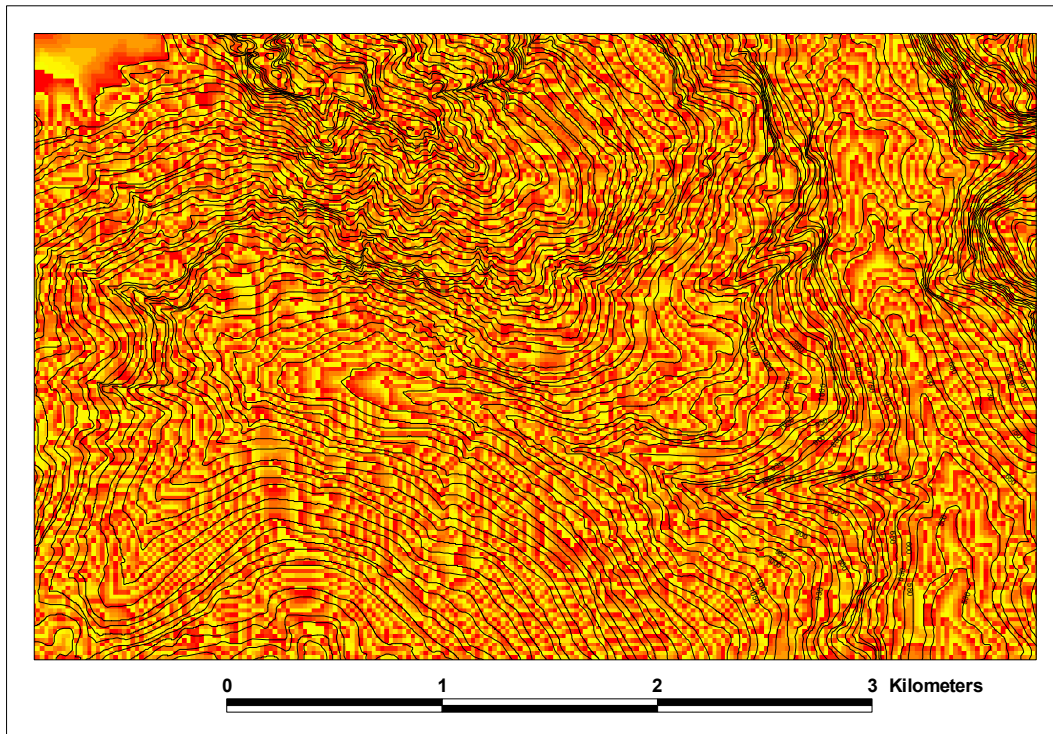


Fig. 10. Porzione dell'area test_1. Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **C** i cui i valori altimetrici sono stati arrotondati al metro ed espressi da una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti.

4.3.1. Indice di qualità'

La fase successiva dell'indagine ha portato alla ricerca e realizzazione di una procedura volta a fornire un indice numerico in grado di esprimere in forma sintetica in che misura un DTM soddisfi i primi due criteri di qualità sopra enunciati.

La procedura, di seguito descritta, è stata quindi implementata, come *macro* AML, in ARC/INFO e fornita ai ricercatori del CNR-XXXX affinché potessero verificare la qualità dei DTM prodotti nell'ambito della convenzione in oggetto.

In breve, la filosofia alla base di detta procedura, assume che le curve di livello, ottenute (*calcolate*) da un DTM (*raster*) affidabile, debbano avere un andamento molto simile a quello delle isoipse (*originali*) da cui il medesimo è stato derivato (primo e secondo criterio di qualità').

Tale congruenza spaziale (*positional matching*) sarà funzione dell'efficienza dell'algoritmo utilizzato, ma anche della dimensione della cella del DTM scelta (20x20 m nel caso in esame).

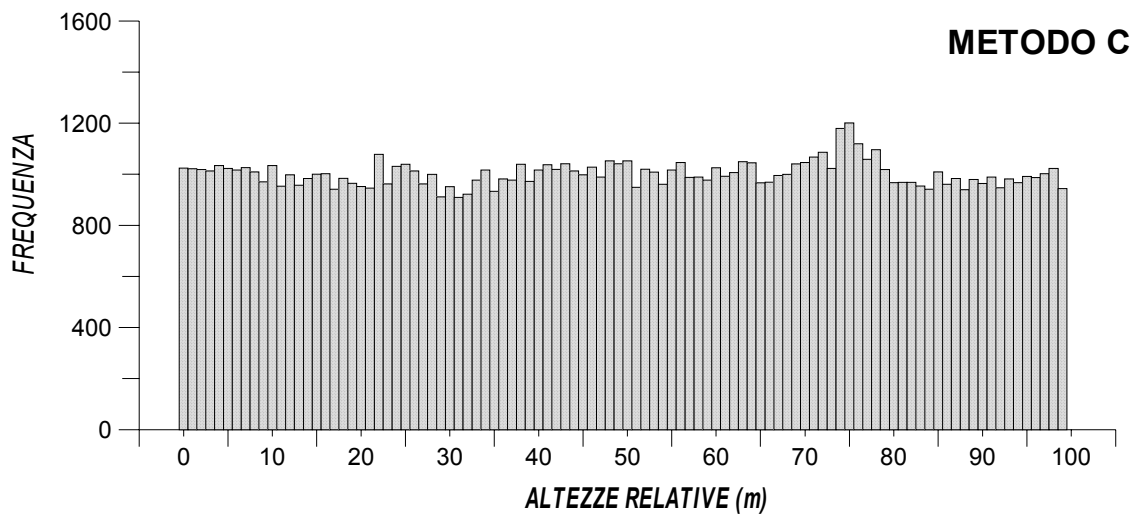
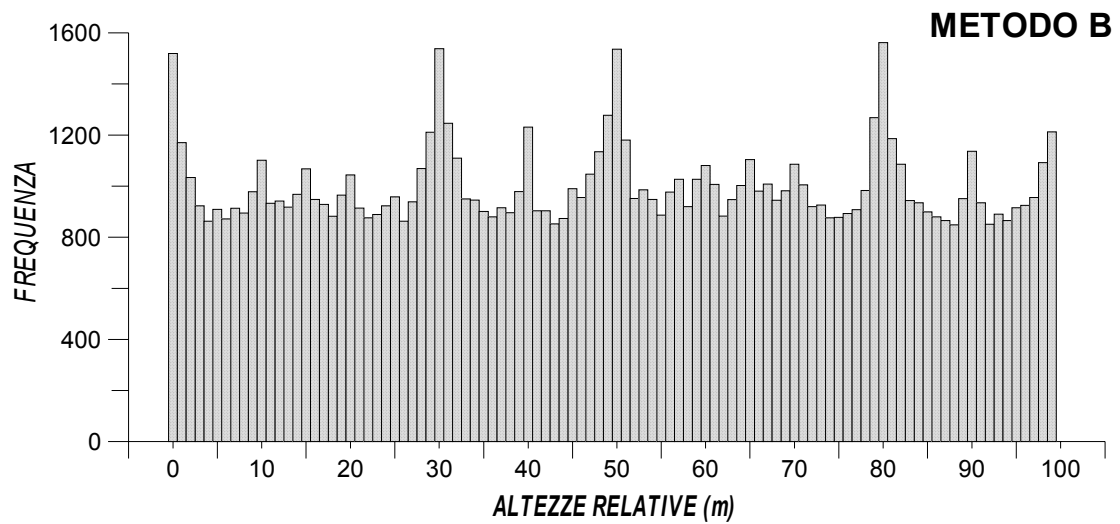
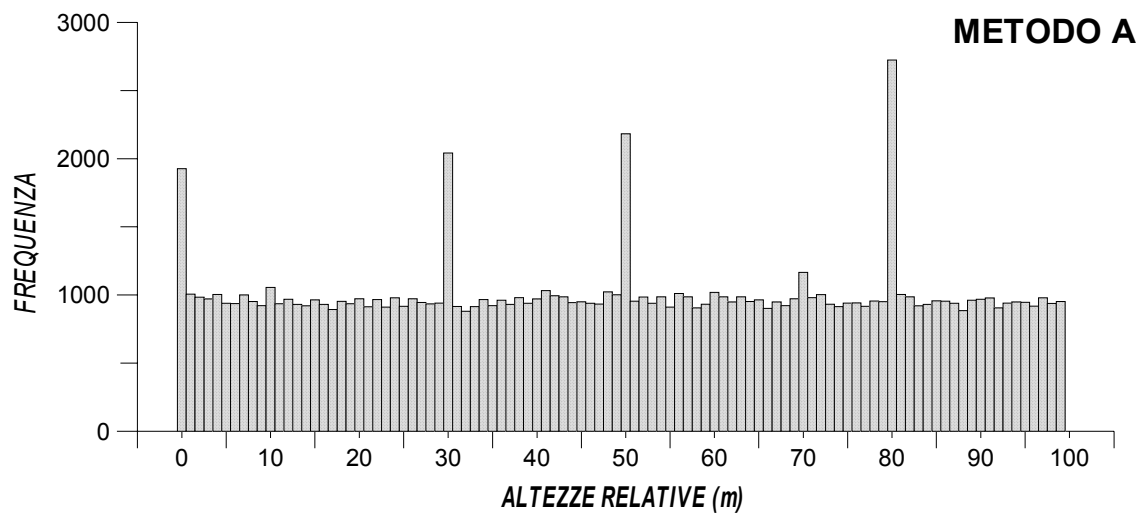


Fig. 11. Area test 1 (Chiavenna). Distribuzione di frequenza delle altezze *relative* alle curve di livello dei 100 m. I valori di quota delle isoipse intermedie sono pari a 30, 50 e 80. Le quote del DTM sono arrotondate al metro.

La procedura in oggetto si articola nelle seguenti fasi:

- i. Generazione dal DTM in studio di curve di livello con valori altimetrici uguali a quelli delle curve originali (nel caso in esame: quelle dei 30, 50, 80 e 100 m) da porre a confronto con queste ultime.*
- ii. Creazione di tante cover separate: una per ogni classe di valori delle isoipse sia delle curve calcolate che di quelle originali (nel caso in esame: 4 cover, corrispondenti alle curve dei 30, 50, 80 e 100 m, per ognuna delle due famiglie di isoipse). Tale disaggregazione dei dati lineari si rende necessaria in aree a forte pendenza ove il ridotto interspazio tra coppie di isoipse puo' inficiare operazioni spaziali quali la creazione di aree buffer.*
- iii. Creazione attorno a ogni curva originale di un buffer di ampiezza pari alla dimensione della cella del raster (nel caso in esame: 20 m) e generazione delle relative cover a struttura poligonale. Ogni poligono di buffer rappresenta lo scostamento massimo accettato tra le curve originali e quelle calcolate.*
- iv. Creazione di cover contenenti le curve originali e quelle calcolate di pari valore altimetrico (nel caso in esame: quelle dei 30, 50, 80, 100 m) e costruzione della relativa struttura poligonale ove ogni poligono esprime la discrepanza posizionale tra le curve originali e quelle calcolate.*
- v. Unione di ciascuna cover di cui al punto iii) con la corrispondente cover di cui al punto iv) e determinazione dei poligoni di errore identificati come quelli e solo quelli situati al di fuori dell'area di buffer di cui al punto iii).*
- vi. Sommatoria dell'area di tutti i poligoni di errore per ogni cover di unione e sua normalizzazione tramite divisione dell'area di errore per l'area totale di buffer.*

Si precisa che la procedura in questione non considera curve di livello con valore diverso da quello predefinito (curve ausiliare) ne' e' in grado di identificare automaticamente se ogni isoipsa originale sia stata correttamente quotata nella fase di digitalizzazione.

Si precisa altresì che la presenza di curve chiuse (sommita' di rilievi) crea dei poligoni che devono essere identificati e trattati separatamente. Il problema e' stato risolto in forma *quasi* esaustiva assegnando (automaticamente) alle curve chiuse un opportuno codice di riconoscimento e sottraendo l'area di tali poligoni da quella dei *veri* poligoni di errore.

Per l'area di Chiavenna, e' stata quindi applicata la procedura alle curve di livello generate da ognuno dei tre DTM.

In Fig. 12, 13 e 14, sono visualizzate, per una piccola porzione dell'area di studio, le curve dei 100 m originali (in verde) e derivate (in rosso) dai DTM prodotti con i metodi **A**, **B** e **C**. Da un esame qualitativo emergono chiaramente gli scostamenti delle seconde dalle prime tanto nelle curve ottenute dal DTM dell'algoritmo **A**, quanto in quelle derivate dall'algoritmo **B**. I migliori risultati sono invece forniti dal DTM del metodo **C**.

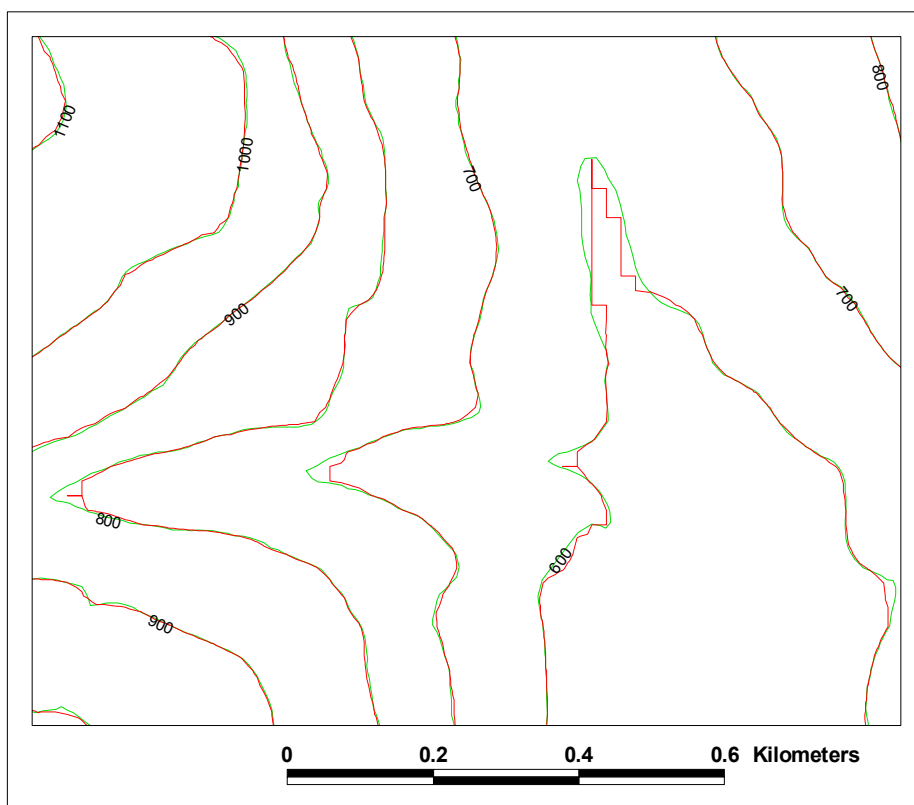


Fig. 12. Porzione dell'area test 1 (Chiavenna). Visualizzazione delle curve di livello dei 100 m originali (in verde) e derivate (in rosso) dal DTM ottenuto con il metodo **A**.

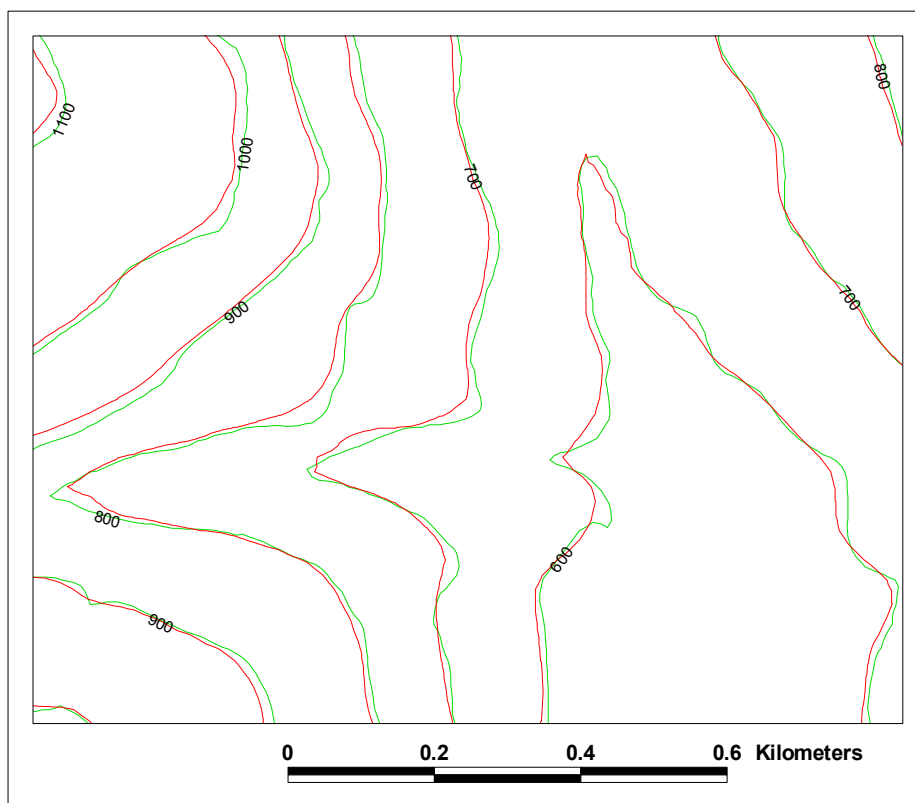


Fig. 13. Porzione dell'area test 1 (Chiavenna). Visualizzazione delle curve di livello dei 100 m originali (in verde) e derivate (in rosso) dal DTM ottenuto con il metodo **B**.

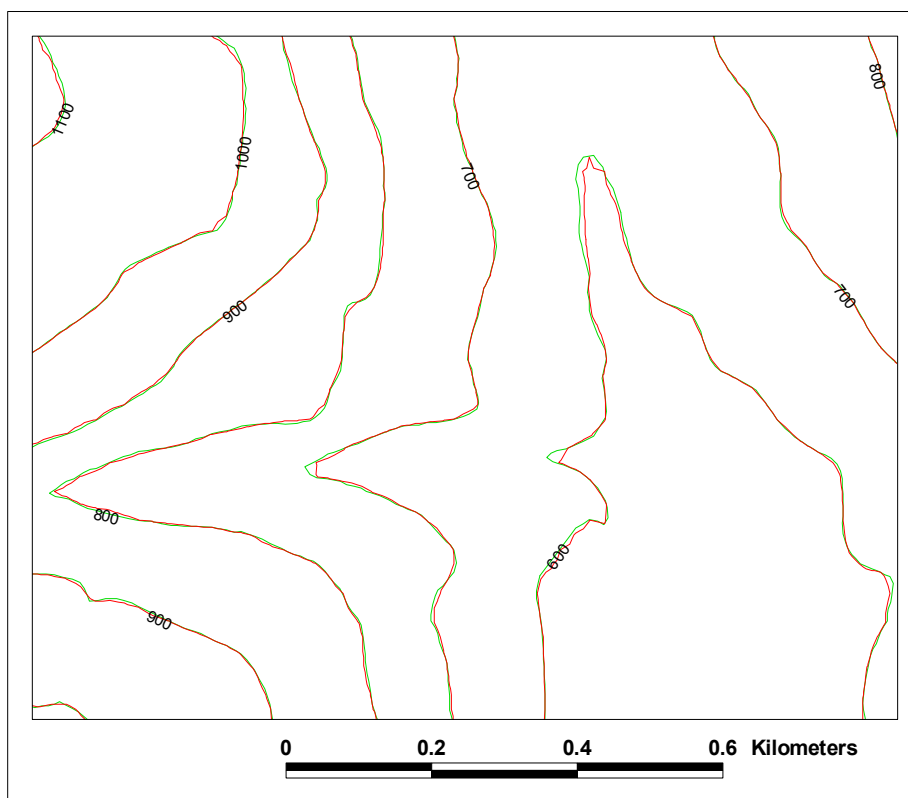


Fig. 14. Porzione dell'area test 1 (Chiavenna). Visualizzazione delle curve di livello dei 100 m originali (in verde) e derivate (in rosso) dal DTM ottenuto con il metodo C.

Secondo quanto descritto precedentemente, la valutazione del grado di congruenza spaziale tra le curve originali e quelle calcolate e' espressa dalla sommatoria delle aree dei poligoni definiti dagli scostamenti delle seconde rispetto alle prime, posti al di fuori dell'area di buffer (Fig. 15).

In Fig. 16, 17 e 18, sono visualizzati sia i poligoni che ricadono all'interno dell'area di buffer (in verde), da considerarsi congruenti con l'incertezza posizionale inerente alla dimensione della cella del DTM, sia quelli situati all'esterno del buffer (in rosso), classificati quali errori dell'algoritmo di generazione del DTM.

Dall'esame delle tre figure, e dai dati riassuntivi riportati in Tabella 1, emerge che nelle curve generate dal DTM del metodo A i poligoni d'errore sono relativamente poco numerosi (902) con una percentuale di area inferiore all'1%; tali valori aumentano di 5 e 10 volte per le curve derivate dal DTM del metodo B mentre le isoipse ottenute dal DTM dell'algoritmo C sono sostanzialmente prive di errori.

In conclusione, sulla base delle diverse tipologie di validazione dei dati si puo' trarre un quadro complessivo della qualita' dei tre DTM, riportato in Tabella 2. Da questo emerge che la valutazione di un DTM richiede un insieme di operazioni d'ordine sia qualitativo che quantitativo

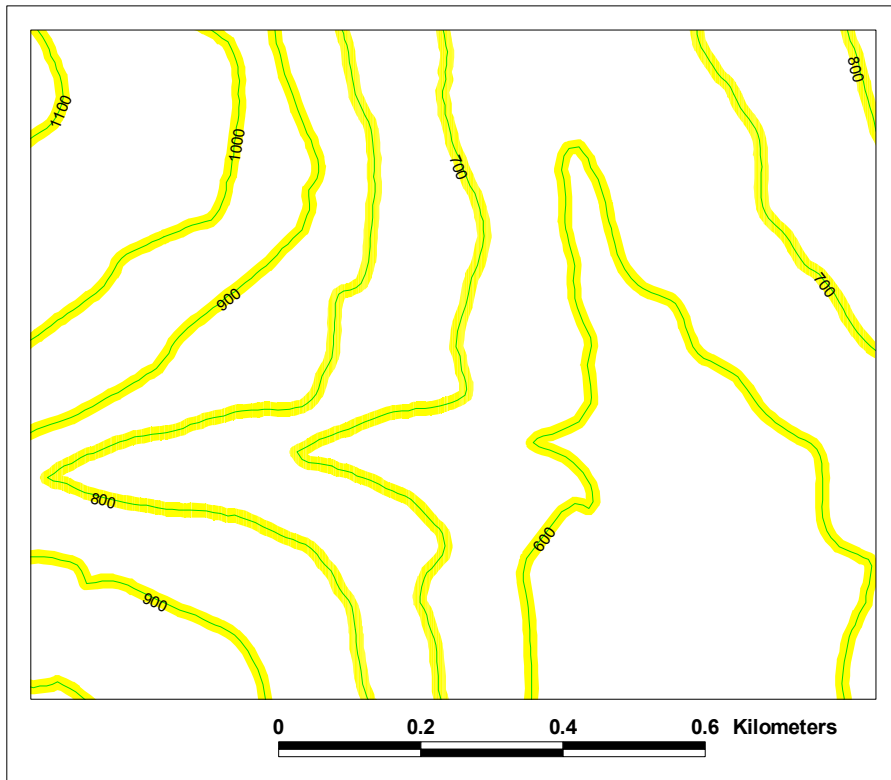


Fig. 15. Porzione dell'area test 1 (Chiavenna). Visualizzazione delle curve di livello dei 100 m originali (in verde) e dell'area di buffer di ampiezza pari al lato del DTM.

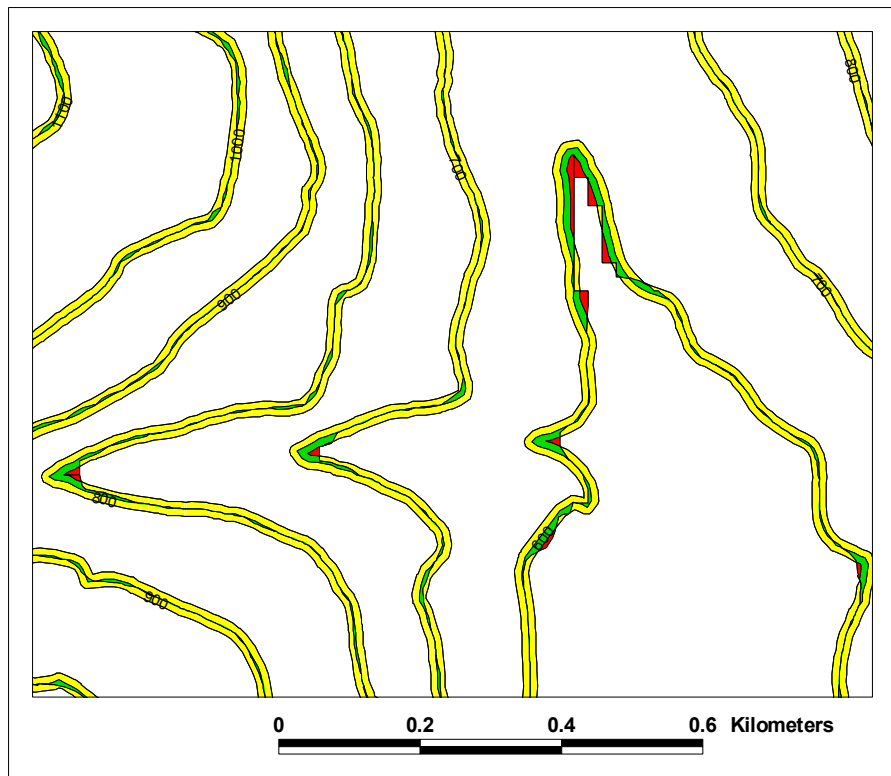


Fig. 16. Porzione dell'area test 1. Visualizzazione dei poligoni che ricadono all'interno dell'area di buffer (in verde) e di quelli esterni alla medesima (in rosso). Solo questi ultimi sono classificati come errore dell'algoritmo di generazione del DTM ottenuto con il metodo **A**.

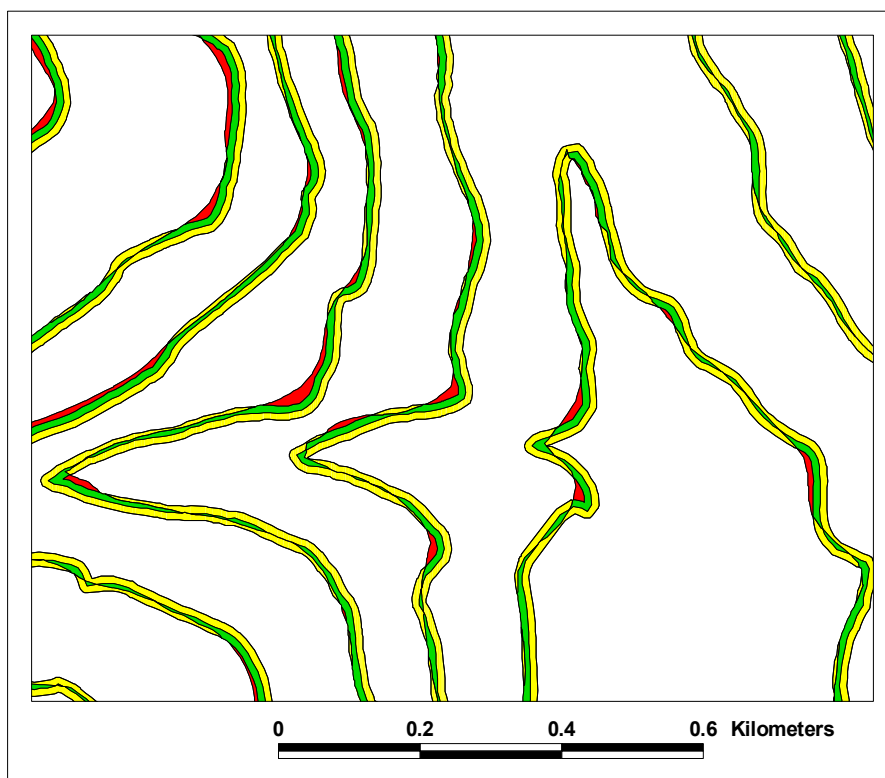


Fig. 17. Porzione dell'area test 1. Visualizzazione dei poligoni che ricadono all'interno dell'area di buffer (in verde) e di quelli esterni alla medesima (in rosso). Solo questi ultimo sono classificati come errore dell'algoritmo di generazione del DTM ottenuto con il metodo **B**.

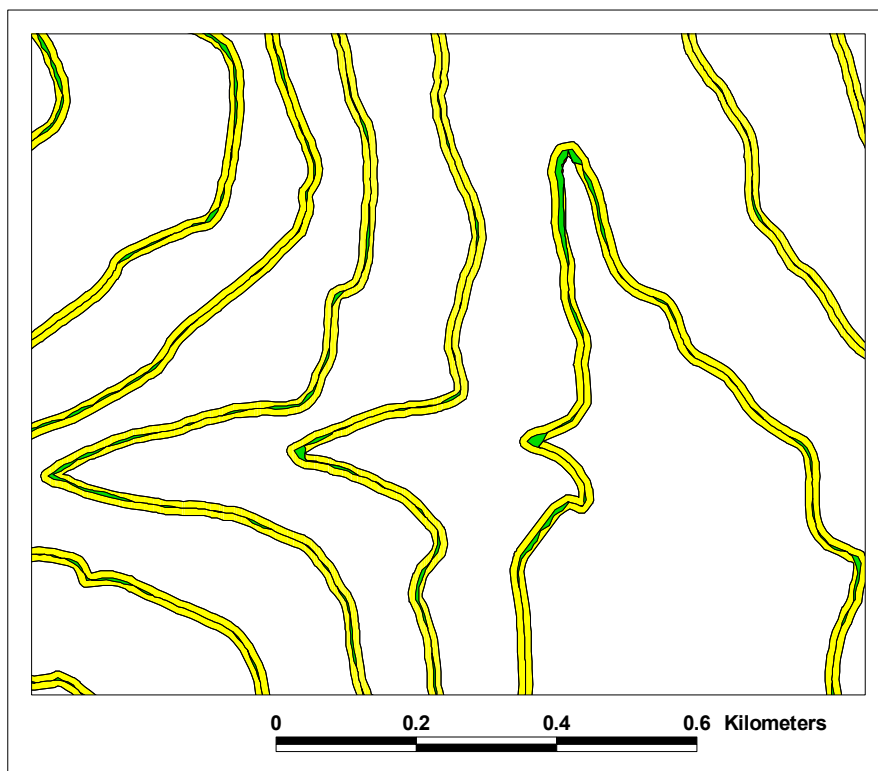


Fig. 18. Porzione dell'area test 1. Visualizzazione dei poligoni che ricadono all'interno dell'area di buffer (in verde) e di quelli esterni alla medesima (in rosso). Solo questi ultimo sono classificati come errore dell'algoritmo di generazione del DTM ottenuto con il metodo **C**.

Tabella 1. Area test 1 (Chiavenna). Numero, area media ed area totale dei poligoni di errore; quest'ultima e' espressa come percentuale dell'area totale dei buffer costruiti attorno alle isoipse originali

Errore associato alle isoipse derivate dai tre DTM (Chiavenna)	METODO A	METODO B	METODO C
Numero di poligoni di errore	902	5144	80
Area media dei poligoni di errore	138.4 m	265.4 m	32.7 m
Area totale dei poligoni di errore (%)	0.52 %	5.72%	0.01%

Tabella 2. Area test 1 (Chiavenna). Valutazione complessiva della qualita'dei tre generatori di DTM.

Tipo di valutazione dei tre DTM (Chiavenna)	Qualita' del DTM A	Qualita' del DTM B	Qualita' del DTM C
Esame visivo delle immagini riclassificate (criteri <i>i - v</i>)	bassa	media	alta
Test statistico (criteri <i>iii e iv</i>)	bassa	bassa	alta
Indice numerico (criteri <i>i e ii</i>)	alta	bassa	alta

4.4. Area test 2

Anche per la seconda area di studio (Chiuro) il primo test ha riguardato la verifica di congruenza di ogni DTM rispetto ai primi tre criteri di qualità sopra elencati. Si precisa che per l'area in questione, a scopo sperimentale, sono state digitalizzate tutte le curve di livello riportate sul CTR e quindi il contenuto informativo d'ingresso è circa il doppio di quello dell'area test precedente.

È stata scelta una sottozona, di circa 6 km², che riflette una conformazione morfologica a basso rilievo: un letto fluviale a debole gradiente longitudinale delimitato da versanti acclivi. I dati di ogni DTM sono stati quindi raggruppati in classi i cui limiti corrispondono ai valori altimetrici delle isoipse e alle prime è stata assegnata una sequenza di colori per i 10 intervalli di quota ricadenti fra ogni coppia di isoipse dei 100 m (Fig. 19, 20 e 21). Successivamente, alle quote dei DTM, arrotondate al metro, è stata assegnata una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti (Fig. 22,23 e 24).

Si premette che dove la pendenza del versante è elevata (porzioni nord-orientale e sud-occidentale dell'area in esame) l'imprecisione legata alla dimensione della cella del raster (20x20 m) non permette di effettuare alcuna reale valutazione della qualità del modello. Limitando quindi l'analisi alle aree a pendenza moderata, l'esame visivo di dette immagini rivela chiaramente che l'algoritmo **C** soddisfa in larga misura i primi tre criteri di qualità: i limiti delle classi colorimetriche del DTM coincidono con l'andamento delle curve di livello e, all'interno di ogni coppia di curve, tutte le classi da un metro sono egualmente rappresentate (Fig. 21 e 24). Il DTM ottenuto con il metodo **B** offre risultati sufficientemente soddisfacenti in relazione tanto ai primi due criteri di qualità quanto al terzo (Fig. 20 e 23). Tuttavia, in corrispondenza della parte centrale della piana alluvionale, emergono dossi e depressioni dall'aspetto largamente inverosimile (*iv e v* criterio di qualità, Fig. 20 e 23). Anche il DTM ottenuto con il metodo **A** fornisce risultati sufficientemente soddisfacenti rispetto ai primi tre criteri (Fig. 19). Tuttavia, anche questo metodo interpola le quote della pianura generando situazioni morfologiche assai poco verosimili (artefatti), come evidenziato dall'immagine di Fig. 22.

Si è quindi proceduto ad effettuare un test statistico sulla frequenza dei valori di quota interpolati tra ogni coppia di isoipse (*terzo* criterio di qualità). A tal fine, le quote di ogni DTM sono state ricodificate come *distanze verticali* dalla coppia di isoipse dei 100 m. Come ricordato in precedenza, sotto l'ipotesi di una interpolazione lineare delle quote tra ogni coppia di isoipse, la distribuzione di frequenza di detti valori dovrà essere di tipo *rettangolare*. Eventuali scostamenti da tale distribuzione attesteranno o situazioni morfologiche particolari (esempio: estese zone pianeggianti vuoi di valle vuoi di altipiano), o un cattivo funzionamento dell'algoritmo interpolatore.

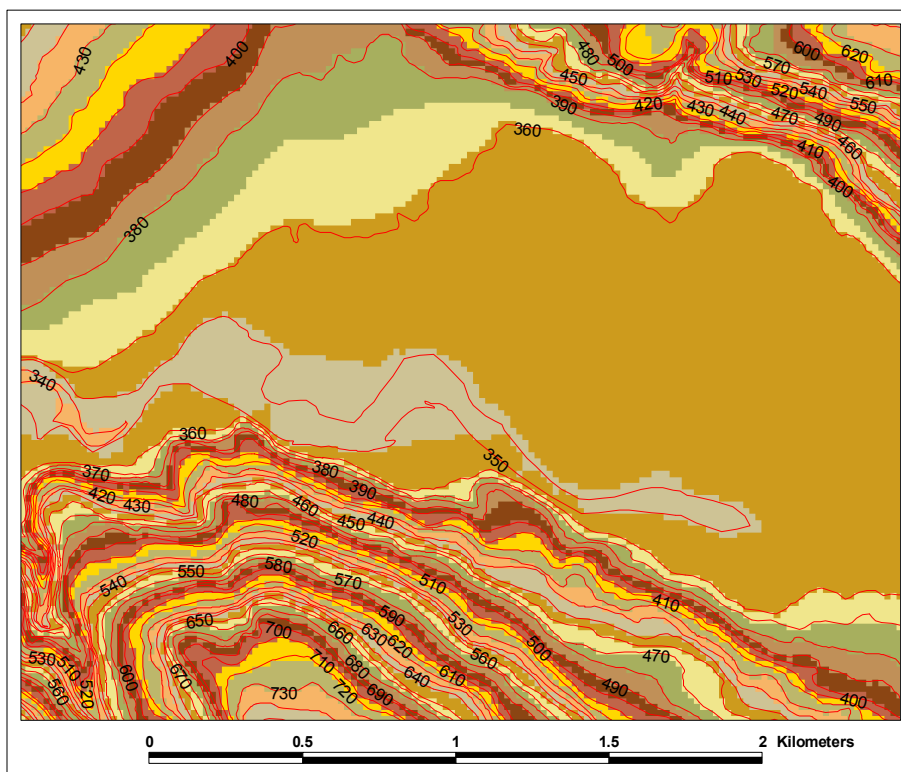


Fig. 19. Porzione dell'area test_2 (Chiuro). Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **A** i cui i valori altimetrici sono stati raggruppati in classi con limiti corrispondenti ai valori di quota delle isoipse.

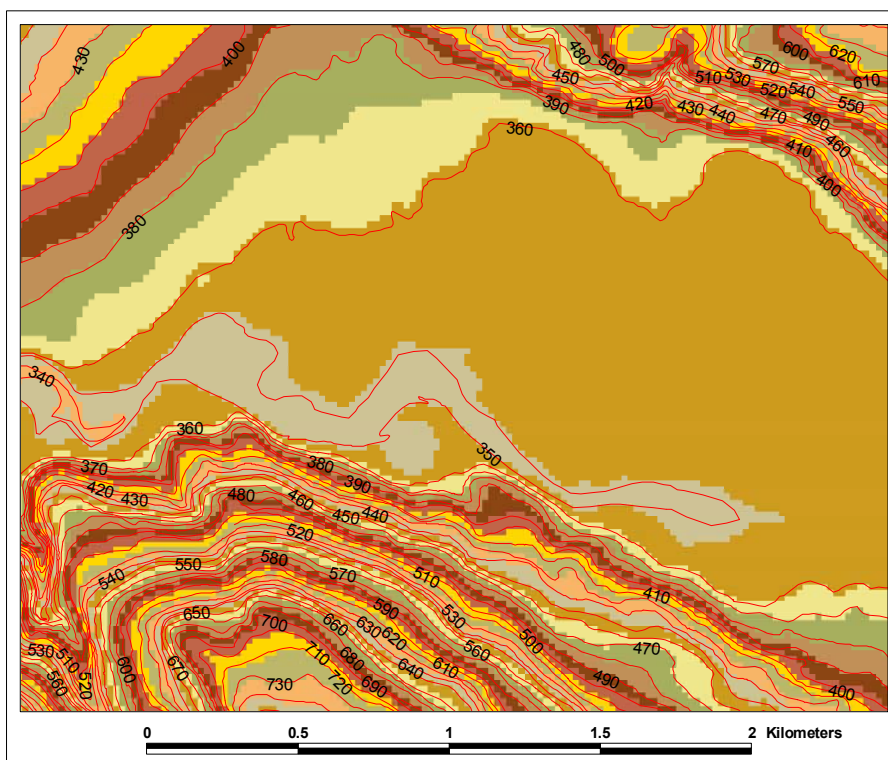


Fig. 20. Porzione dell'area test_2 (Chiuro). Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **B** i cui i valori altimetrici sono stati raggruppati in classi con limiti corrispondenti ai valori di quota delle isoipse.

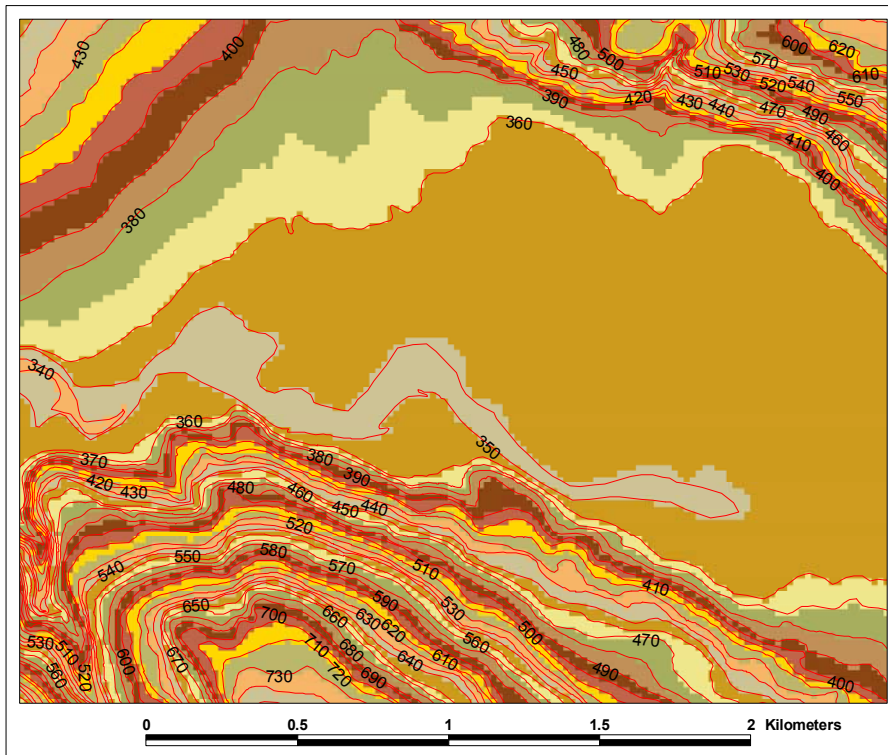


Fig. 21. Porzione dell'area test_2 (Chiuro). Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **C** i cui i valori altimetrici sono stati raggruppati in classi con limiti corrispondenti ai valori di quota delle isoipse.

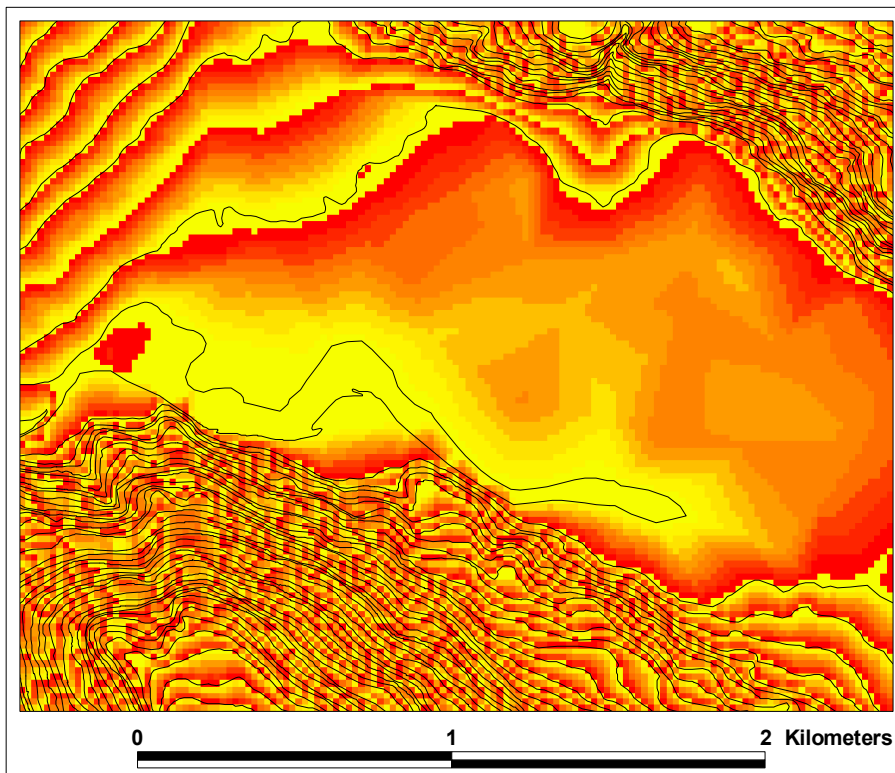


Fig. 22. Porzione dell'area test_2. Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **A** i cui i valori altimetrici sono stati arrotondati al metro ed espressi da una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti.

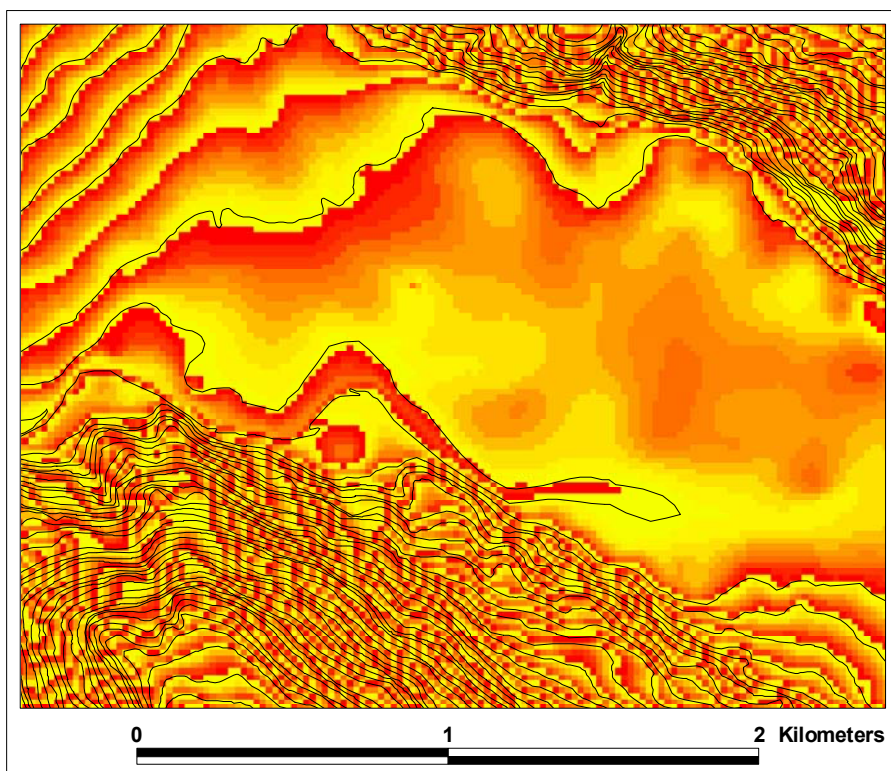


Fig. 23. Porzione dell'area test_2. Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **B** i cui i valori altimetrici sono stati arrotondati al metro ed espressi da una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti.

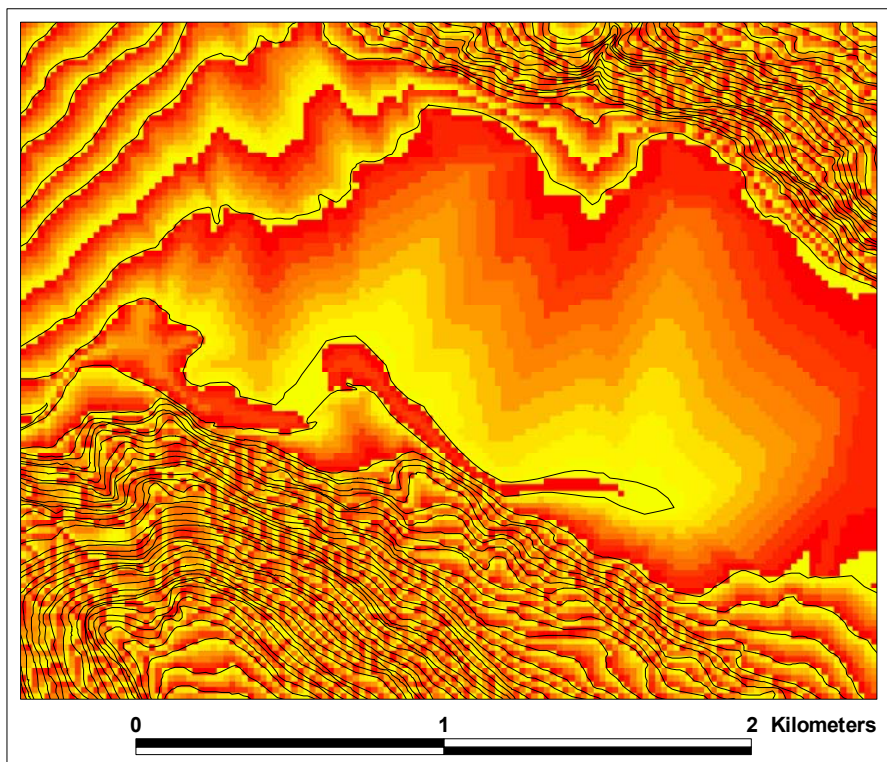


Fig. 24. Porzione dell'area test_2. Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **C** cui i valori altimetrici sono stati arrotondati al metro ed espressi da una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti.

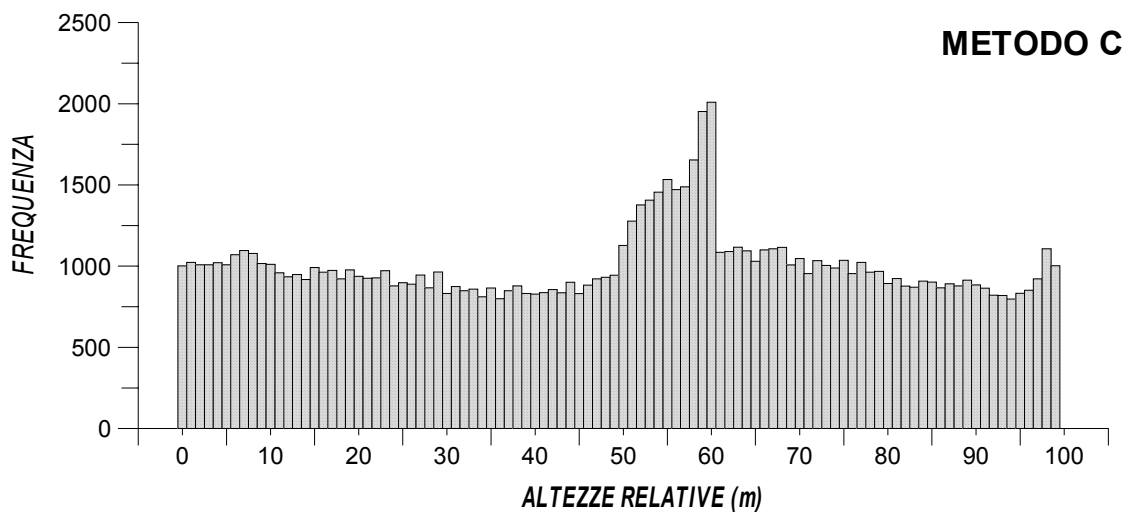
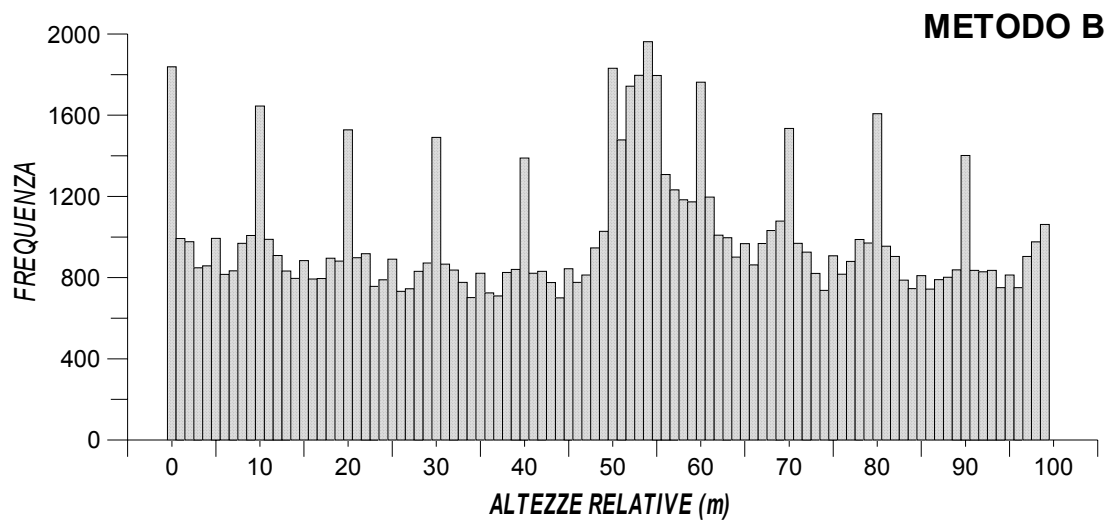
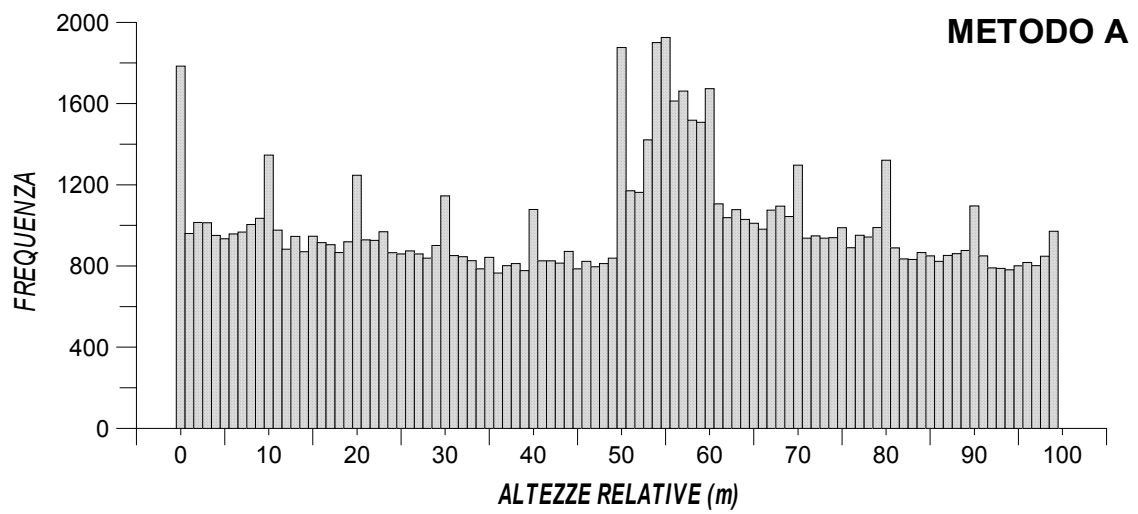


Fig. 25. Area test 2 (Chiuro). Distribuzione di frequenza delle altezze *relative* alle curve di livello dei 100 m. L'equidistanza delle curve di livello e' pari a 10 m. Le quote del DTM sono arrotondate al metro.

Dall'esame degli istogrammi di Fig. 25, risulta che i metodi **A** e **B** producono istogrammi con frequenze elevate coincidenti esattamente con le quote delle isoipse. In particolare, nel DTM del metodo **B** la frequenza di tali quote e' sistematicamente doppia rispetto a quella di ogni altro valore altimetrico. Solo il metodo **C** fornisce una distribuzione di frequenza di forma quasi rettangolare, cio' con l'esclusione della fascia altimetrica compresa tra le classi di quota 50-60 m, il cui elevato picco di frequenza (comune a tutti e tre gli istogrammi) non e' frutto del fallimento dell'algoritmo interpolatore ma bensì alla presenza dell'estesa piana alluvionale compresa tra le isoipse 350 e 360 (Fig. 21 e 24). Pertanto, i modelli altimetrici **A** e **B** forniscono un'irrealistica rappresentazione del paesaggio, caratterizzata da aree pianeggianti in corrispondenza di ogni isoipsa e pendici variamente acclivi nell'interspazio tra le medesime.

In conclusione, sulla base delle osservazioni sopra descritte, i metodi che forniscono i risultati migliori sono, nell'ordine, **C**, **A** e **B**.

4.4.1. Indice di qualita'

Anche per l'area di Chiuro, e' stata applicata la procedura per il calcolo dell'indice di qualita' alle curve di livello generate da ognuno dei tre DTM. Si precisa che, per facilitare il confronto tra i risultati ottenuti nelle tre aree test, l'analisi e' stata confinata alle curve direttrici (dei 100 e 50 m) e alle intermedie dei 30 ed 80 m.

Secondo quanto descritto precedentemente, la valutazione del grado di congruenza spaziale tra le curve originali e quelle calcolate e' espressa dalla sommatoria delle aree dei poligoni definiti dagli scostamenti delle seconde rispetto alle prime, posti al di fuori dell'area di buffer. In Fig. 26, 27 e 28, sono visualizzati i poligoni (in rosso) situati all'esterno dell'area di buffer, classificati quali errori dell'algoritmo di generazione del DTM.

Dall'esame delle tre figure, e dai dati riassuntivi riportati in Tabella 3, emerge che nelle curve generate dal DTM del metodo **A** i poligoni d'errore sono poco numerosi (307) con una percentuale di area prossima all'1%; tali valori aumentano di 5 e 2 volte per le curve derivate dal DTM del metodo **B**, (1411 poligoni con un'area totale di errore pari al 2%) mentre le isoipse ottenute dal DTM dell'algoritmo **C** sono sostanzialmente prive di errori (0.16%). Pertanto, rispetto all'area test di Chiavenna, i metodi **A** e **B** hanno fornito risultati uguali o migliori, mentre la risposta del metodo **C** e' rimasta sostanzialmente invariata. Tale risultato e' attribuibile al fatto che, per l'area in questione, l'equidistanza delle isoipse di input e' mediamente la meta' rispetto a quella dell'area di Chiavenna; di tale l'informazione altimetrica hanno maggiormente beneficiato gli interpolatori meno sofisticati (**A** e **B**).

In conclusione, sulla base delle diverse tipologie di validazione dei dati si puo' trarre un quadro complessivo della qualita' dei tre DTM, riportato in Tabella 4. Da questo si conferma che la valutazione di un DTM richiede un insieme di operazioni d'ordine sia *qualitativo* che *quantitativo*.

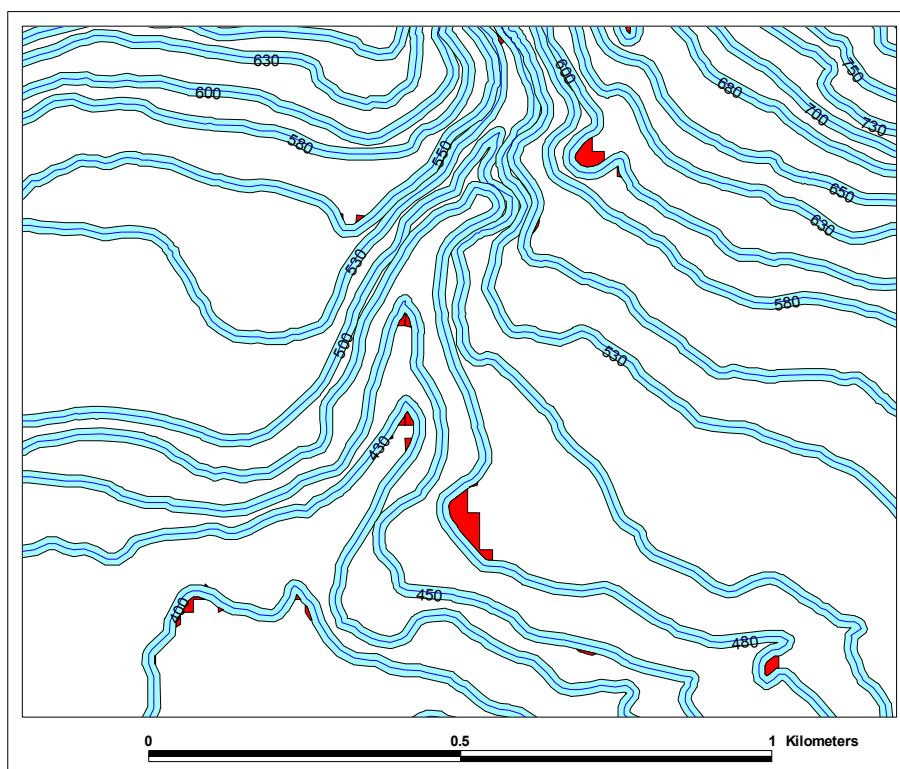


Fig. 26. Porzione dell'area test_2. Visualizzazione dei poligoni (in rosso) che ricadono all'esterno dell'area di buffer (in azzurro) delle isoipse. Questi rappresentano l'errore dell'algoritmo di generazione del DTM ottenuto con il metodo **A**.

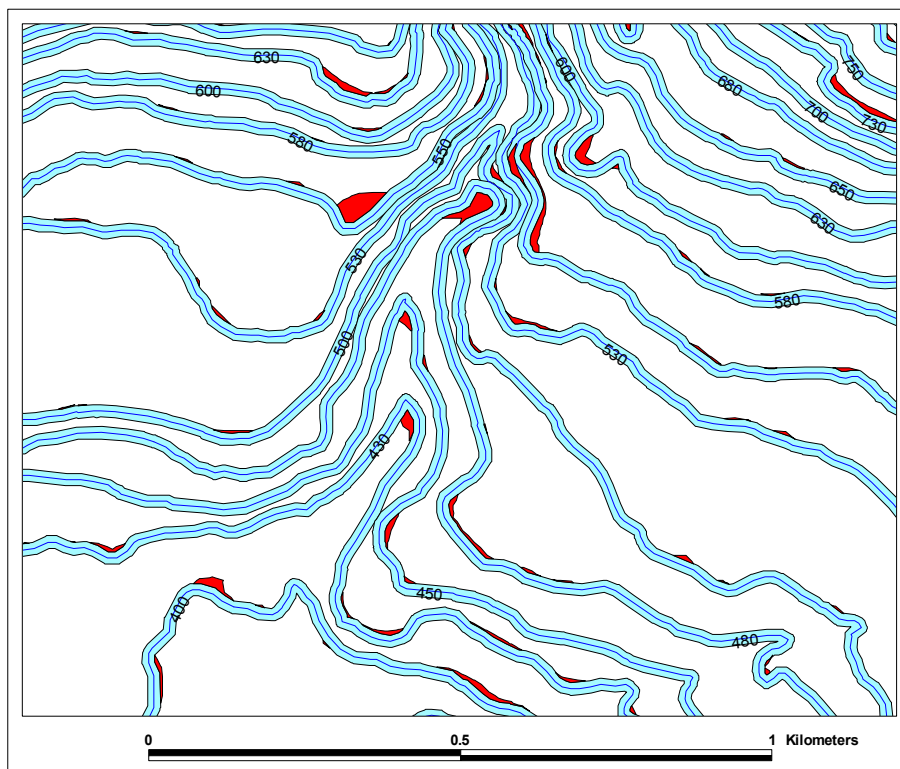


Fig. 27. Porzione dell'area test_2. Visualizzazione dei poligoni (in rosso) che ricadono all'esterno dell'area di buffer (in azzurro) delle isoipse. Questi rappresentano l'errore dell'algoritmo di generazione del DTM ottenuto con il metodo **B**.

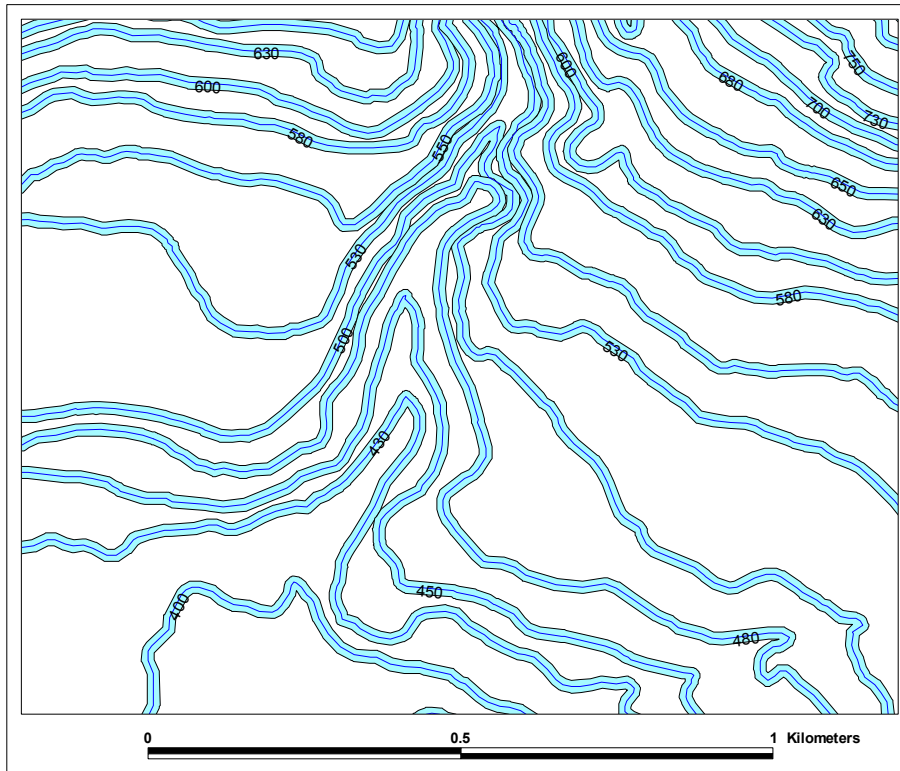


Fig. 28. Porzione dell'area test_2. Visualizzazione dei poligoni (in rosso) che ricadono all'esterno dell'area di buffer (in azzurro) delle isoipse. Questi rappresentano l'errore dell'algoritmo di generazione del DTM ottenuto con il metodo C.

Tabella 3. Area test 2 (Chiuro). Numero, area media ed area totale dei poligoni di errore; quest'ultima e' espressa come percentuale dell'area totale dei buffer costruiti attorno alle isoipse originali

Errore associato alle isoipse derivate dai tre DTM (Chiuro)	METODO A	METODO B	METODO C
Numero di poligoni di errore	307	1411	61
Area media dei poligoni di errore	388.3 m	158.9 m	289.7 m
Area totale dei poligoni di errore (%)	1.10 %	2.07 %	0.16 %

Tabella 4. Area test 2 (Chiuro). Valutazione complessiva della qualità dei tre generatori di DTM.

Tipo di valutazione dei tre DTM (Chiuro)	Qualità del DTM A	Qualità del DTM B	Qualità del DTM C
Esame visivo delle immagini riclassificate (criteri <i>i - v</i>)	media	media	alta
Test statistico (criteri <i>iii e iv</i>)	bassa	bassa	alta
Indice numerico (criteri <i>i e ii</i>)	alta	media	alta

4.5. Area test 3

Anche per la terza area di studio (Toscolano Maderno) il primo test ha riguardato la verifica di congruenza di ogni DTM rispetto ai primi tre criteri di qualità sopra elencati. Si precisa che per l'area in questione, oltre alle curve dei 30, 50, 80 e 100 m, sono state digitalizzate curve o tratti di curva con altra quota là dove fosse richiesto per facilitare il buon funzionamento dell'algoritmo di interpolazione/tasselazione.

E' stata scelta una sottozona, di circa 2 km², che riflette una conformazione morfologica caratterizzata da dossi gentilmente acclivi e letti torrentizi a moderato gradiente longitudinale delimitati da versanti poco acclivi.

I dati di ogni DTM sono stati quindi raggruppati in classi i cui limiti corrispondono ai valori altimetrici delle isoipse e alle prime e' stata assegnata una sequenza di colori per i 4 intervalli di quota dei 30, 50, 80 m ricadenti fra ogni coppia di isoipse dei 100 m (Fig. 29, 30 e 31). A riguardo, si precisa che, per il loro carattere discontinuo, non sono state considerate le curve aggiuntive.

Successivamente, alle quote dei DTM, arrotondate al metro, e' stata assegnata una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti (Fig. 32,33 e 34).

Si ricorda ancora una volta che dove la pendenza del versante e' elevata l'imprecisione legata alla dimensione della cella del raster (20x20 m) non permette di effettuare alcuna reale valutazione della qualità del modello. Limitando quindi l'analisi alle aree a pendenza moderata, l'esame visivo di dette immagini rivela chiaramente che l'algoritmo **C** soddisfa in larga misura i primi tre criteri di qualità: i limiti delle classi colorimetriche del DTM coincidono con l'andamento delle curve di livello e, all'interno di ogni coppia di curve, tutte le classi da un metro sono egualmente rappresentate (Fig. 31 e 34). Il DTM

ottenuto con il metodo **B** offre risultati parzialmente soddisfacenti in relazione tanto ai primi due criteri di qualità quanto al terzo. Tuttavia, lungo il corso del torrente principale e sulle sommità dei dossi, i limiti delle classi di quota del DTM non seguono l'andamento delle corrispondenti curve di livello (Fig. 30 e 33). Il DTM ottenuto con il metodo **A** fornisce risultati analoghi a quelli del metodo **B**, con l'aggravante di una maggiore discrepanza tra limiti di classe di quota del DTM e andamento delle corrispondenti curve (Fig. 29 e 32).

Si è quindi proceduto ad effettuare l'ormai noto test statistico sulla frequenza dei valori di quota interpolati tra ogni coppia di isoipse (*terzo criterio di qualità*). A tal fine, le quote di ogni DTM sono state ricodificate come *distanze verticali* dalla coppia di isoipse dei 100 m. Come ricordato in precedenza, sotto l'ipotesi di una interpolazione lineare delle quote tra ogni coppia di isoipse, la distribuzione di frequenza di detti valori dovrà essere di tipo *rettangolare*. Eventuali scostamenti da tale distribuzione attesteranno o situazioni morfologiche particolari (esempio: estese zone pianeggianti vuoi di valle vuoi di altipiano), o un cattivo funzionamento dell'algoritmo interpolatore.

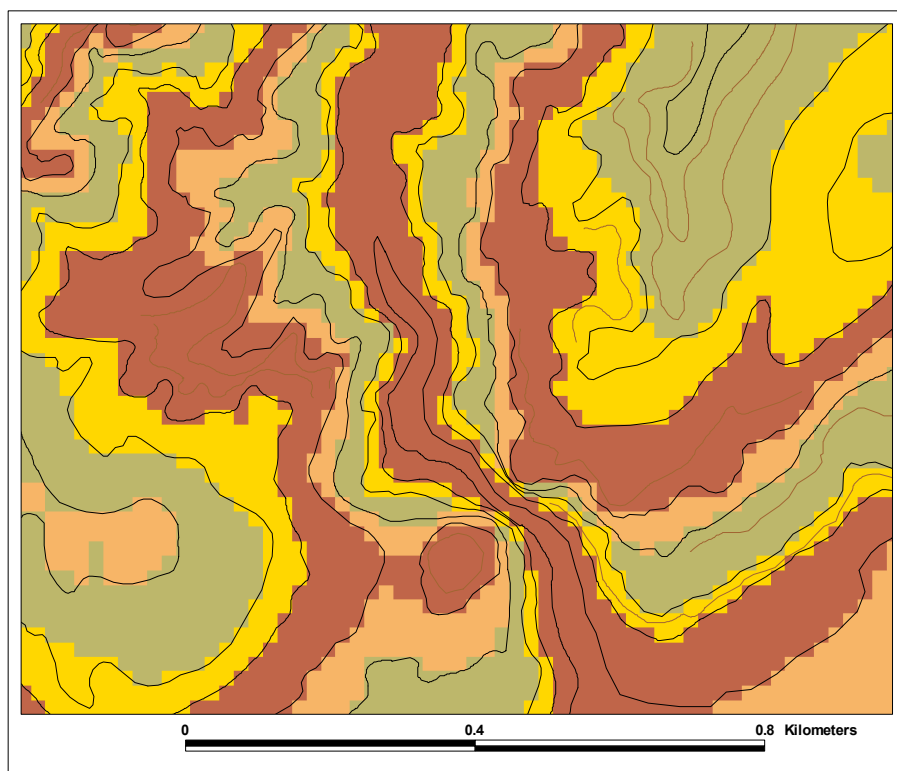


Fig. 29. Porzione dell'area test_3 (Toscolano Maderno). Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **A** i cui i valori altimetrici sono stati raggruppati in classi con limiti corrispondenti ai valori di quota delle direttrici dei 100 e 50 m e delle ausiliarie dei 30 ed 80 m.

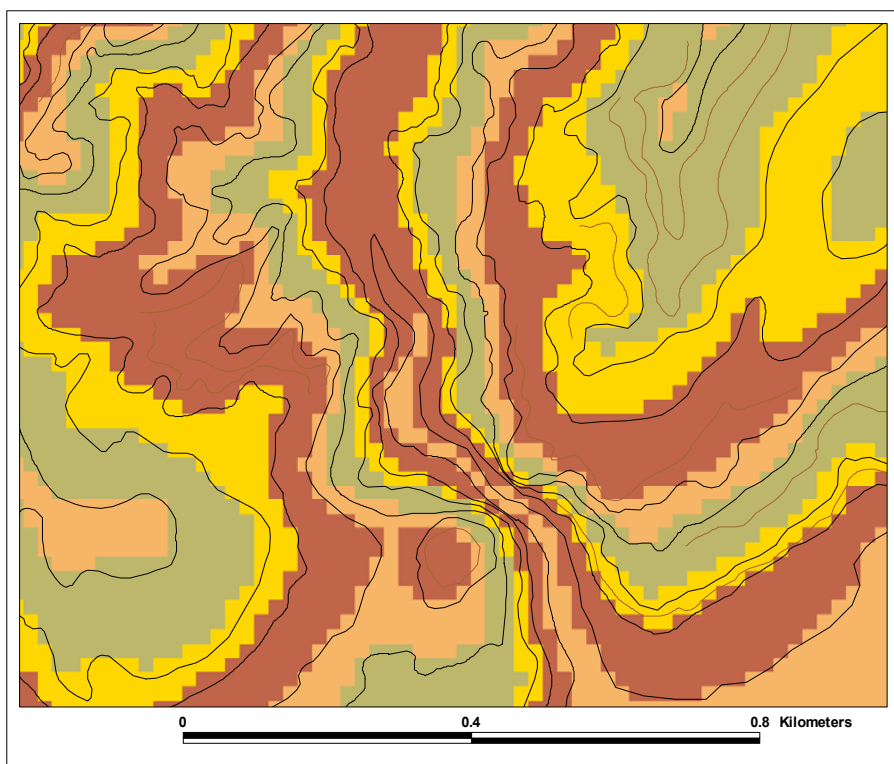


Fig. 30. Porzione dell'area test_3 (Toscolano Maderno). Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **B** i cui i valori altimetrici sono stati raggruppati in classi con limiti corrispondenti ai valori di quota delle direttrici dei 100 e 50 m e delle ausiliarie dei 30 ed 80 m.

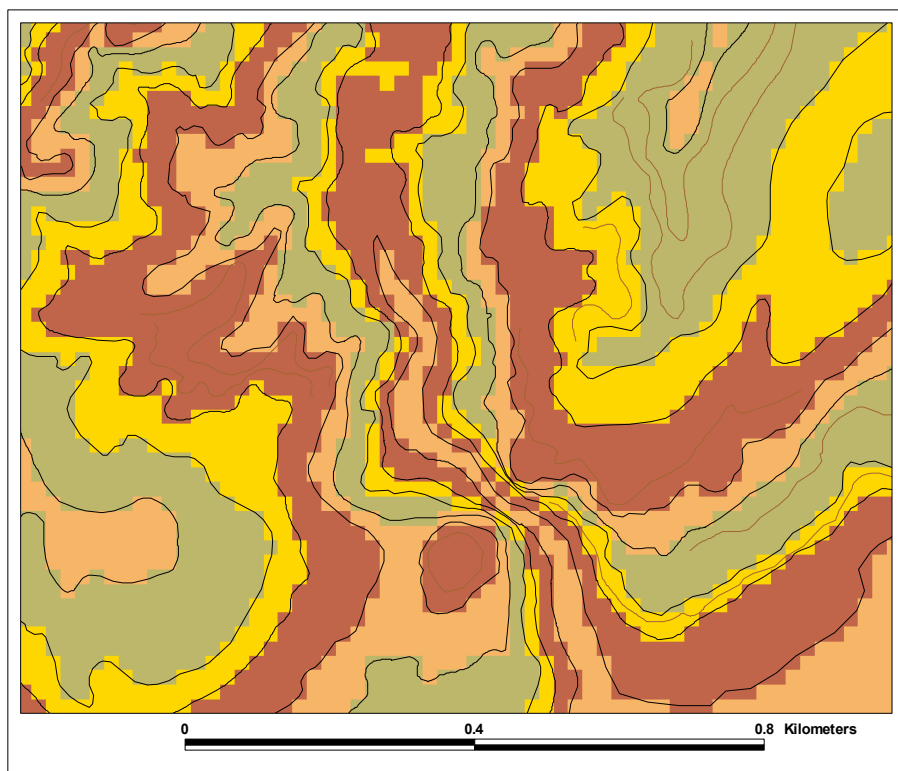


Fig. 31. Porzione dell'area test_3 (Toscolano Maderno). Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **C** i cui i valori altimetrici sono stati raggruppati in classi con limiti corrispondenti ai valori di quota delle direttrici dei 100 e 50 m e delle ausiliarie dei 30 ed 80 m..

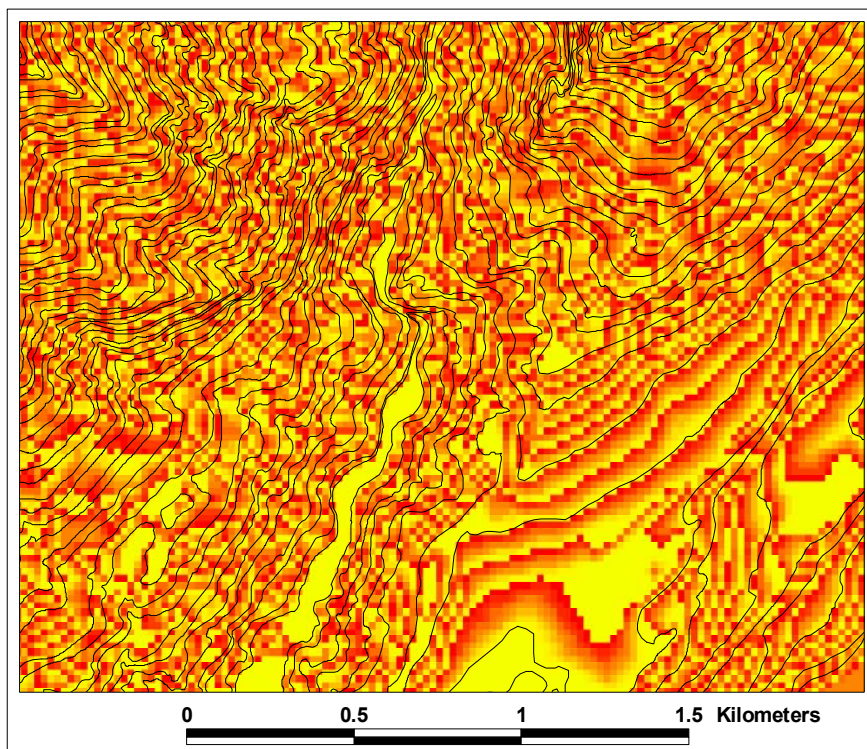


Fig. 32. Porzione dell'area test_3. Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **A** i cui i valori altimetrici sono stati arrotondati al metro ed espressi da una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti.

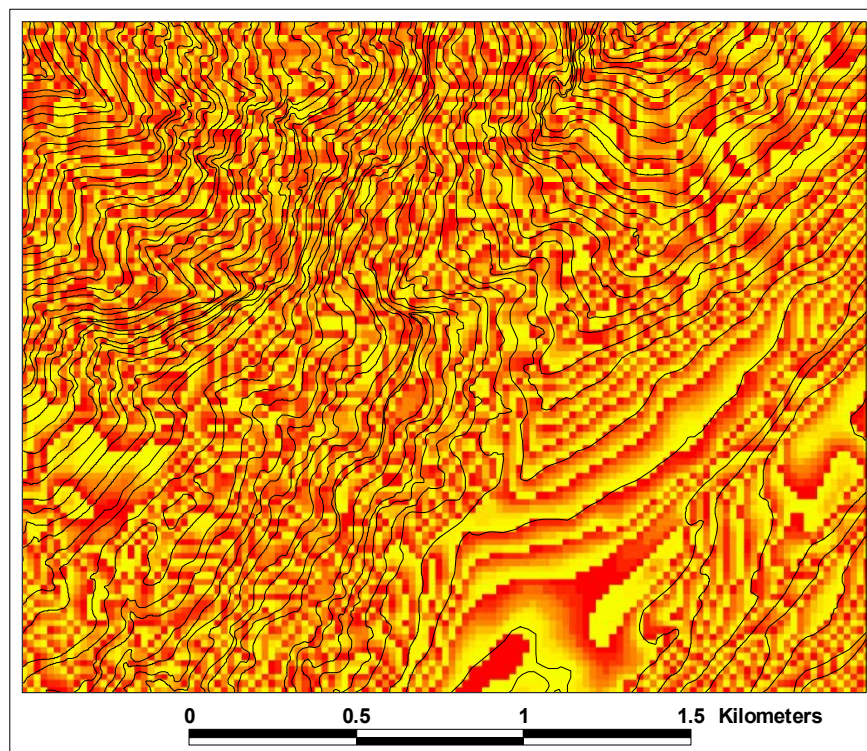


Fig. 33. Porzione dell'area test_3. Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **B** i cui i valori altimetrici sono stati arrotondati al metro ed espressi da una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti.

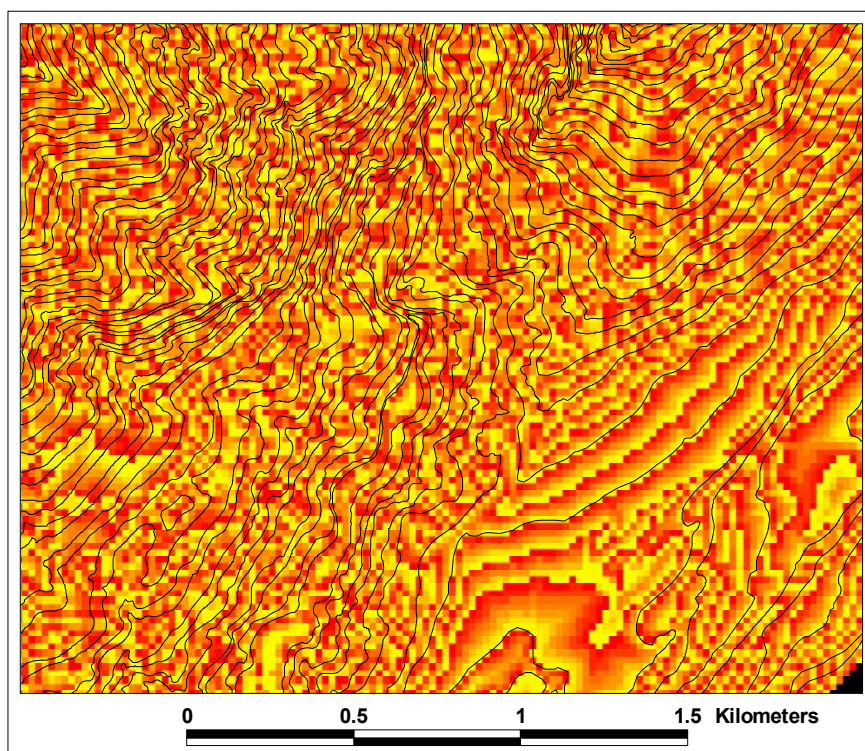


Fig. 34. Porzione dell'area test_3. Visualizzazione del DTM ottenuto con il metodo **C** cui i valori altimetrici sono stati arrotondati al metro ed espressi da una sequenza colorimetrica (dal giallo al rosso) per dieci intervalli di quota ciclicamente ripetuti.

Dall'esame degli istogrammi di Fig. 35, risulta che i metodi **A** e **B** producono istogrammi con frequenze elevate coincidenti esattamente con le quote delle isoipse. In particolare, nel DTM del metodo **A** la frequenza delle quote corrispondenti alle isoipse dei 30, 50, 80 e 100 m risulta da tre a sei volte maggiore rispetto a quella degli altri valori altimetrici del DTM. I picchi di frequenza delle isoipse "aggiuntive" (10, 20, 40, 60, 70 e 90 m) sono, ovviamente, meno evidenti in funzione della loro limitata continuita' spaziale.

Solo il metodo **C** fornisce una distribuzione di frequenza di forma quasi rettangolare. Pertanto, i modelli altimetrici **A** e **B** forniscono un'irrealistica rappresentazione del paesaggio, caratterizzata da aree pianeggianti in corrispondenza di ogni isoipsa e pendici variamente acclivi nell'interspazio tra le medesime.

In conclusione, sulla base delle osservazioni sopra descritte, i metodi che forniscono i risultati migliori sono, nell'ordine, **C**, **B** ed **A**.

4.5.1. Indice di qualita'

Anche per l'area di Toscolano Maderno, e' stata applicata la procedura per il calcolo dell'indice di qualita' alle curve di livello generate da ognuno dei tre DTM. Si precisa che, per facilitare il confronto tra i risultati ottenuti nelle tre aree test, l'analisi e' stata confinata alle curve direttrici (dei 100 e 50 m) e alle intermedie dei 30 ed 80 m.

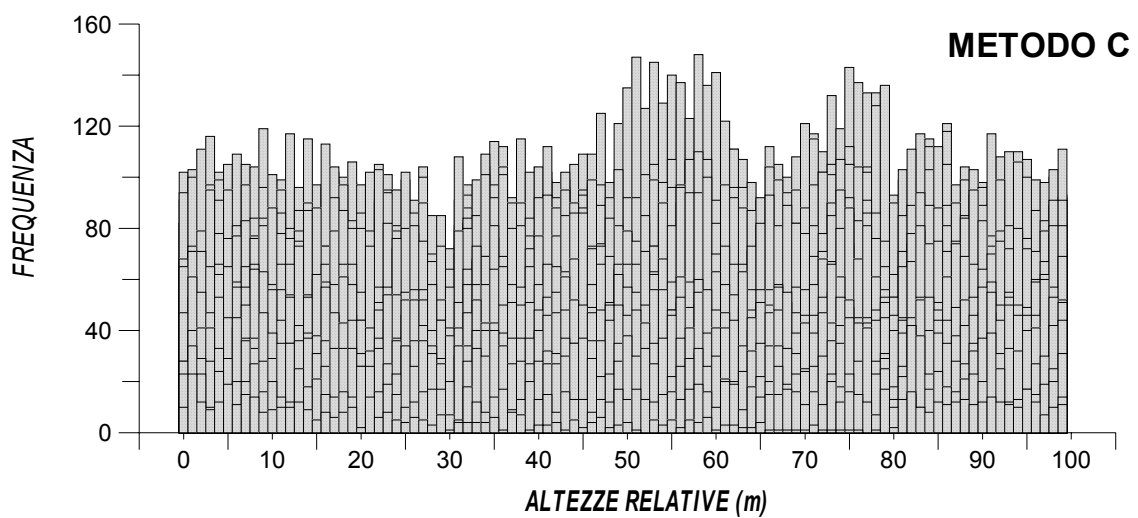
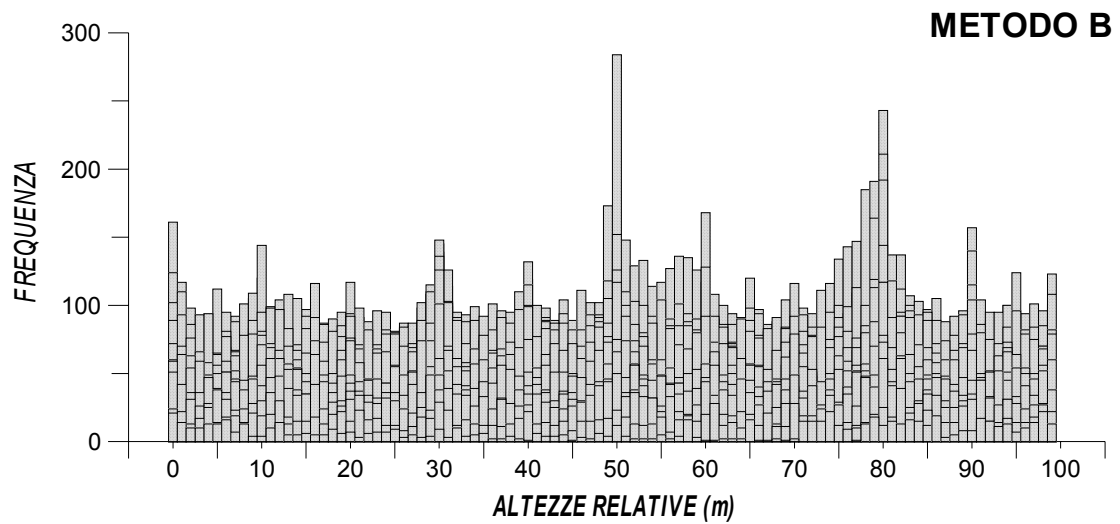
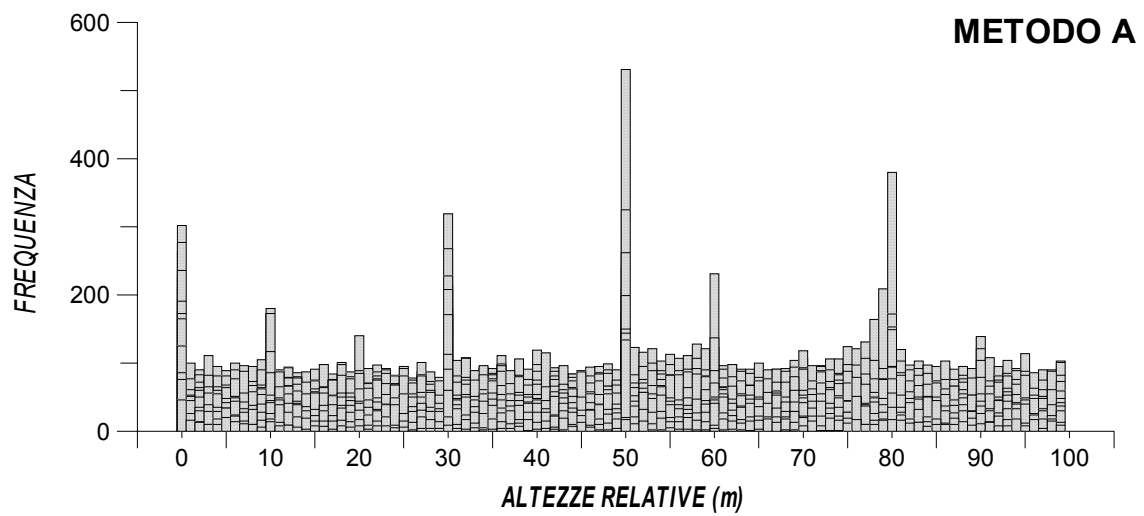


Fig. 35. Area test 3 (Toscolano Maderno). Distribuzione di frequenza delle altezze *relative* alle curve di livello dei 100 m. I valori di quota delle isoipse intermedie sono pari a 30, 50 e 80 m. A queste si aggiungono, in modo non sistematico, le curve dei 10, 20, 40, 60, 70 e 90 m. Le quote del DTM sono arrotondate al metro.

Secondo quanto già illustrato, la valutazione del grado di congruenza spaziale tra le curve originali e quelle calcolate è espressa dalla sommatoria delle aree dei poligoni definiti dagli scostamenti delle seconde rispetto alle prime, posti al di fuori dell'area di buffer. In Fig. 36, 37 e 38, sono visualizzati i poligoni (in rosso) situati all'esterno dell'area di buffer, classificati quali errori dell'algoritmo di generazione del DTM.

Dall'esame delle tre figure, e dai dati riassuntivi riportati in Tabella 5, emerge che nelle curve generate dal DTM del metodo **A** i poligoni d'errore sono numerosi (1109) con una percentuale di area pari all' 1.65%; tali valori aumentano di 6 volte per le curve derivate dal DTM del metodo **B**, (4336 poligoni con un'area totale di errore prossima al 10%) mentre le isoipse ottenute dal DTM dell'algoritmo **C** sono sostanzialmente prive di errori (0.13%). Pertanto, i tre metodi hanno fornito risultati confrontabili a quelli ottenuti nell'area test di Chiavenna ove la quantità di informazione dei dati di ingresso era analoga.

In conclusione, sulla base delle diverse tipologie di validazione dei dati si può trarre un quadro complessivo della qualità dei tre DTM, riportato in Tabella 6. Da questo si conferma che la valutazione di un DTM richiede un insieme di operazioni d'ordine sia *qualitativo* che *quantitativo*.

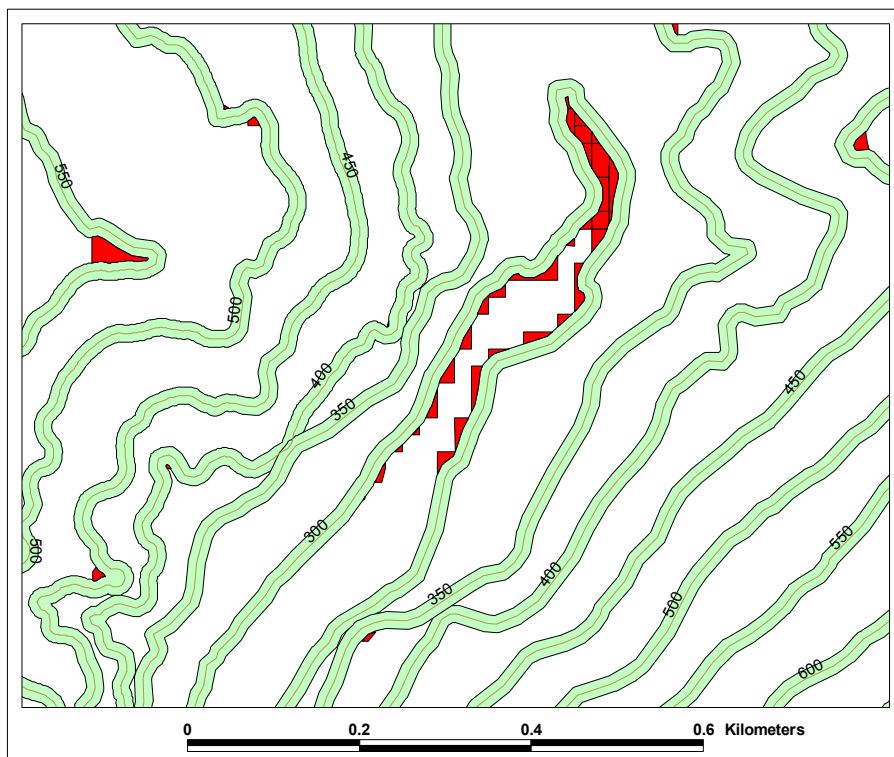


Fig. 36. Porzione dell'area test_3. Visualizzazione dei poligoni (in rosso) che ricadono all'esterno dell'area di buffer (in verde) delle isoipse. Questi rappresentano l'errore dell'algoritmo di generazione del DTM ottenuto con il metodo **A**.

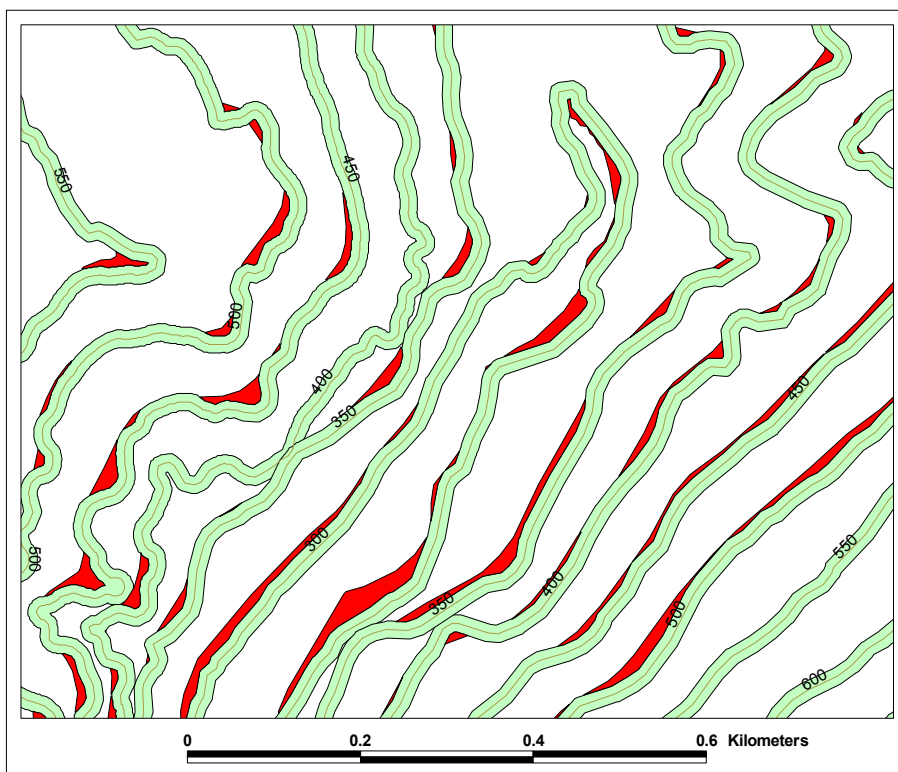


Fig. 37. Porzione dell'area test_3. Visualizzazione dei poligoni (in rosso) che ricadono all'esterno dell'area di buffer (in verde) delle isoipse. Questi rappresentano l'errore dell'algoritmo di generazione del DTM ottenuto con il metodo **B**.

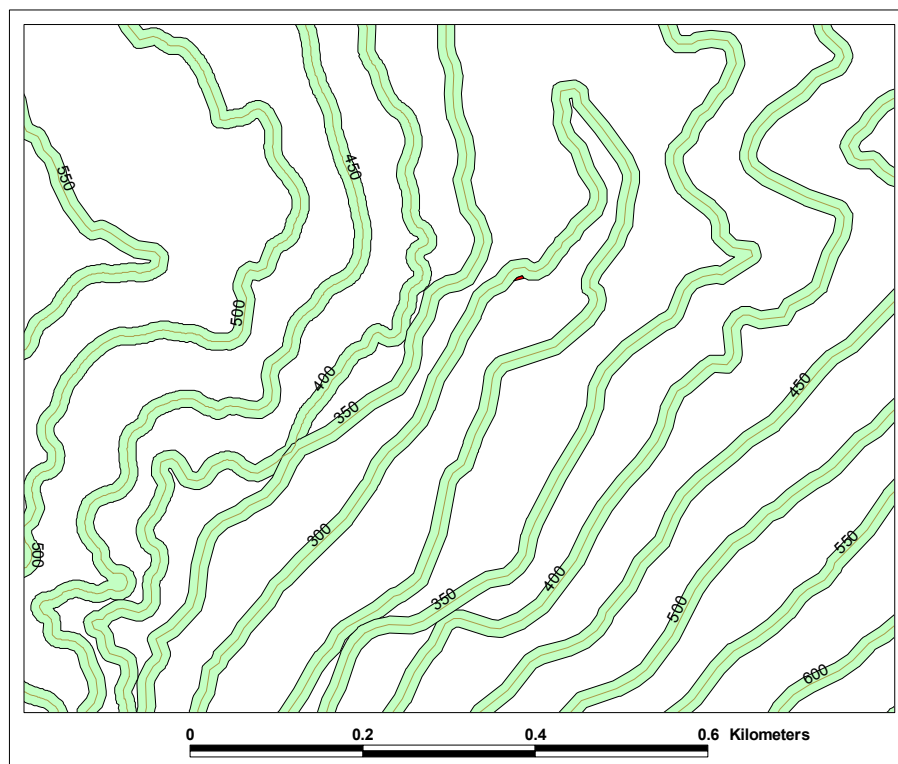


Fig. 38. Porzione dell'area test_3. Visualizzazione dei poligoni (in rosso) che ricadono all'esterno dell'area di buffer (in verde) delle isoipse. Questi rappresentano l'errore dell'algoritmo di generazione del DTM ottenuto con il metodo **C**.

Tabella 5. Area test 3 (Toscolano Maderno). Numero, area media ed area totale dei poligoni di errore; quest'ultima e' espressa come percentuale dell'area totale dei buffer costruiti attorno alle isoipse originali

Errore associato alle isoipse derivate dai tre DTM (Toscolano Maderno)	METODO A	METODO B	METODO C
Numero di poligoni di errore	1109	4336	72
Area media dei poligoni di errore	249.9 m	371.8 m	307.9 m
Area totale dei poligoni di errore (%)	1.65 %	9.59 %	0.13 %

Tabella 6. Area test 3 (Toscolano Maderno). Valutazione complessiva della qualita' dei tre generatori di DTM.

Tipo di valutazione dei tre DTM (Toscolano Maderno)	Qualita' del DTM A	Qualita' del DTM B	Qualita' del DTM C
Esame visivo delle immagini riclassificate (criteri <i>i - v</i>)	media	media	alta
Test statistico (criteri <i>iii e iv</i>)	bassa	bassa	alta
Indice numerico (criteri <i>i e ii</i>)	alta	bassa	alta

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Al termine dell'analisi comparata di tre diversi metodi di generazione di modelli digitali del terreno dalle curve di livello si possono formulare le seguenti considerazioni conclusive.

- I cinque criteri qualitativi, illustrati al Cap. 3, il test statistico sulla distribuzione di frequenza delle altezze relative e l'indice quantitativo di qualità permettono di valutare, in modo sufficientemente oggettivo ed esaustivo, pregi e difetti di un DTM e quindi dell'algoritmo impiegato per la sua generazione.
- Per tutte le tre aree campione, i cinque criteri qualitativi vengono largamente soddisfatti dal metodo **C** e in misura sostanzialmente insufficiente dai metodi **A** e **B**.
- Per tutte le tre aree campione, solo il metodo **C** produce un DTM la cui distribuzione di frequenza è largamente realistica; per contro, i modelli altimetrici ottenuti con gli altri due metodi sono affetti da picchi di frequenza sistematicamente corrispondenti ai valori di quota delle curve di livello di input (Fig. 11, 25 e 35).
- Per tutte le tre aree campione, solo il metodo **C** genera un DTM con una percentuale di poligoni di errore inferiore allo 0.2%; il metodo **A** fornisce una risposta da buona (Chiavenna: 0.52%) a sufficientemente buona (Toscolano Maderno: 1.65%); per contro, il metodo **B** è affetto da inaccettabili errori che vanno dal 2% (Chiuro) a quasi il 10% (Toscolano Maderno).

In conclusione, il metodo **A**, per le sue caratteristiche intrinseche (semplice tassellazione dello spazio secondo la triangolazione di Delaunay) non è sufficientemente idoneo alla generazione di accurati modelli numerici a partire dalle curve di livello digitali.

I metodi **B**, pur basati su algoritmi con logica totalmente diversa, risulta parimenti inadatto ad operare correttamente in aree a bassa informazione morfologica, quali le ampie spianate vallive.

Il metodo **C** genera modelli altimetrici che riflettono correttamente la quasi totalità delle situazioni orografiche (versante, sommità di dossi e valli).

Benché le procedure prese in esame non coprano l'ampio spettro di generatori di DTM esistenti sul mercato, si possono trarre alcune brevi considerazioni generali.

Nella maggior parte dei generatori *raster*, la qualità del modello altimetrico interpolato è funzione della dimensione della cella di rasterizzazione delle curve di livello di ingresso. Al crescere della medesima, insorgono imprecisioni locali, vistosi artefatti e sistematici errori nella distribuzione di frequenza delle quote calcolate. Per contro, per aree vaste l'impiego di celle di piccole dimensioni conducono a problemi di CPU e di memoria di massa non facilmente gestibili con l'attuale tecnologia hardware.

I modelli TIN (**A** e **C**) non soffrono di tale vincolo; tuttavia la tassellazione di Delaunay (metodo **A**) mostra limiti severi in corrispondenza di dossi estesi a basso gradiente e, ancor più, di vaste spianate di fondovalle. Come dimostrato dai test eseguiti col metodo **C**, l'opzione di inserire nel modello punti quotati appartenenti a linee di impluvio e displuvio generate automaticamente e quindi di ricalcolare il modello triangolare sulla scorta anche di tali punti aggiuntivi, costituisce un interessante approccio al problema.

A prescindere dai rispettivi vantaggi dei tre metodi, rimane aperta la questione dell'impiego delle curve di livello quale fonte per la creazione di un DTM. Come ricordato, tale scelta scaturisce da considerazioni economiche e funzionali. Nei paesi occidentali sono generalmente disponibili cartografie topografiche recenti e a grande scala, la cui realizzazione ha comportato ingenti investimenti. Grazie alla tecnologia degli scanner elettronici, la conversione digitale delle isoipse può essere effettuata in modo sufficientemente agevole. Tuttavia, gli errori altimetrici di tali cartografie sono in genere poco conosciuti o trascurati, mentre la generazione di DTM dalle curve di livello trasferisce i medesimi nel modello stesso, incrementati dalle inevitabili imprecisioni delle tecniche di interpolazione/tassellazione.

Una possibile alternativa andrebbe ricercata nell'impiego delle recenti tecniche di stereoscopia digitale, le quali hanno ormai raggiunto un grado di affidabilità sufficiente per la produzione di DTM su vaste aree.

BIBLIOGRAFIA

Bitelli G., Carrara A., De Torres- Curth M. S. e Folloni G., 1993. Topographical database for EFEDA GIS. Echival Field Experiment in a Desertification-Threatened Area (EFEDA), Annex to Final Report, FU Berlin, Berlin.

Bitelli G., Carrara A. & Vittuari L., 1996. Comparison of DTMs derived from contour lines and digital photogrammetry. In Unguendoli U. (ed.), Reports on Surveying and Geodesy, p. 159-179, DISTART, Nautilus, Bologna.

Carlà R., Carrara A. e Federici G., 1987. Generazione di modelli digitali del terreno ad alta precisione. Quaderni Dip. Ingegneria Civile 0/87, Firenze.

Carrara A., 1988. Drainage and divide networks derived from high-fidelity digital terrain models. In: C.F. Chung et al. (eds.), Quantitative analysis of mineral and energy resources, NATO-ASI Series, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, p. 581-597.

Carrara A., Detti R., Federici G. & Pasqui V., 1988. Reticoli idrografici e parametri morfologici di bacino da modelli digitali del terreno. CNR-Linea 3, Gruppo Naz. Difesa Catastrofi Idrogeol., 60 p., Genova.

Carrara A., 1994. Analisi comparata di metodi per la generazione di modelli digitali del terreno. INSIEL S.p.a.-Provincia di Trento, Rapporto Tecnico, Trento.

Carrara A., Carla' R., De Fent I. e Giovannini F., 1996. Analisi comparata di tecniche per al generazione di modelli digitali del terreno. Riv. It. Telerilevamento, v. 6, p. 19-30.

Carrara A., Bitelli G.& Carla' R. 1997. Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. Int. Jour. of Geographical Information Science v. 11, p. 451-473.

Clarke A.L., Gruen A. & Loon J.C., 1982. The application of contour data for generating high fidelity grid digital elevation models. Proceed. AUTOCARTO-V, A.S.P. & A.C.S.M., p. 213- 221.

ESRI, 1991. Surface modelling with TIN. ARC/INFO user guide. ESRI, Redlands, California.

Giovannini, F., Carla' R., Carminati B., Carrara A., Patrono A., 1995. Integrazione di informazioni da satellite e da aereo per il sistema informativo ambiente e territorio della Provincia di Trento. Atti VII Conv. Naz. Ass. It. Telerilevamento, Chieri, 17-20.10.95, p. 295-300, CSEA, Torino.

Hutchinson M.F., 1989. A new procedure for gridding elevation data and stream line data with automatic removal of spurious pits. Jour. Hydro., v. 106, p. 211-232.

Leberl F.W. & Olson D., 1982. Raster scanning for operational digitizing of graphical data. Photogramm. Eng. Remote Sensing, v. 48, p. 615-627.

Palacios-Velez O.L. e Cuevas-Renaud B., 1986. Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data. Jour. Hydrol., v. 86, p. 299-314.

Reichenbach P., Pike R. J., Acevedo W. e Mark R. K., 1993. A new landform map of Italy in computer-shaded relief. Bollettino Geodesia e Scienze Affini, v. 52, p. 22-44.

Tang L., 1992. Raster algorithms for surface modelling. Proceedings of I.S.P.R.S. Congr., Washington July 1992, p. 566-573.

Weibel R. e Heller M., 1991. Digital terrain modelling. In: D. J. Maguire, M. F. Goodchild and D. W. Rhind (eds.), Geographical Information Systems: Principles and Applications, Longman, London, p. 269-297.

Wood J.D., Fisher P.F., 1993. Assessing interpolation accuracy in elevation models. *IEEE Computer Graphics & Applications*, v. 93, p. 48-56.

Yoeli P., 1975. Compilation of data for computer-assisted relief cartography. In: J. C. Davis and M. J. McCullagh (eds.), *Display and analysis of spatial data*, Wiley, New York, p. 352-367.