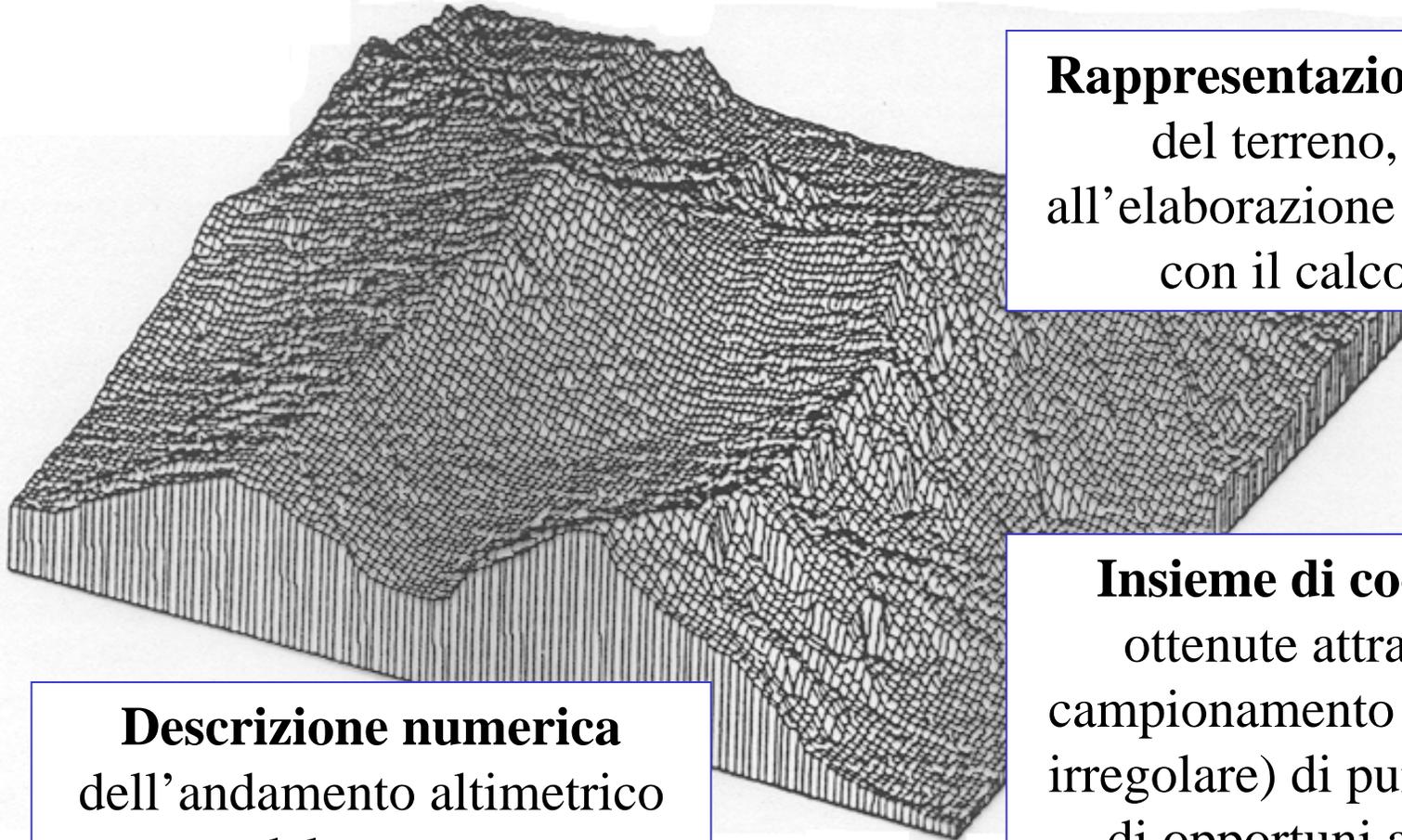


# Modelli Digitali del Terreno (DTM)

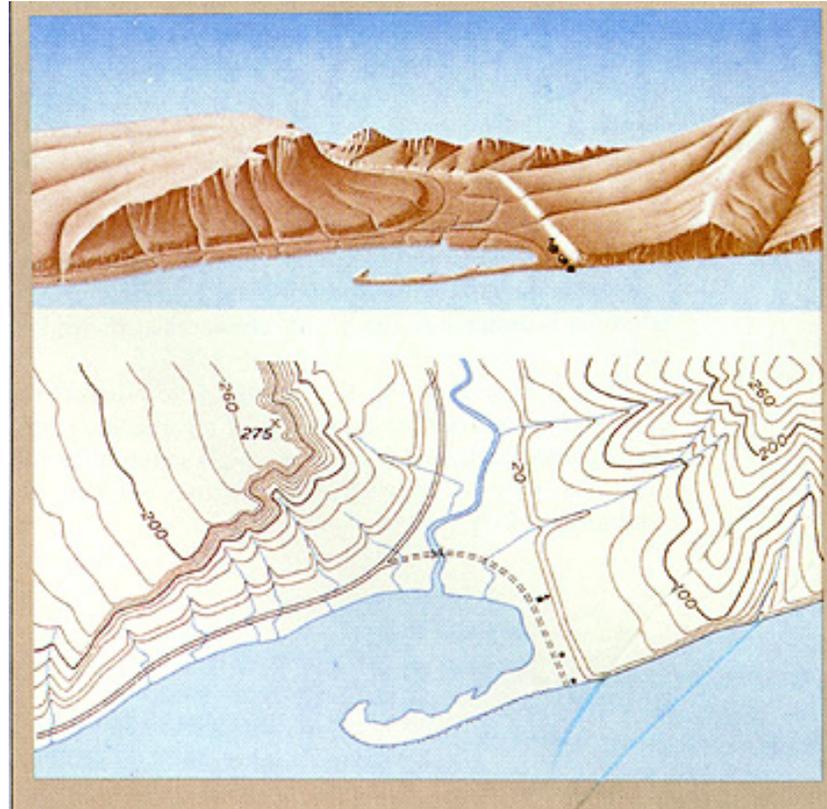


**Rappresentazione digitale**  
del terreno, adatta  
all'elaborazione automatica  
con il calcolatore

**Insieme di coordinate**  
ottenute attraverso il  
campionamento (regolare o  
irregolare) di punti da parte  
di opportuni algoritmi

**Descrizione numerica**  
dell'andamento altimetrico  
del terreno

# Rappresentazione del terreno in cartografia



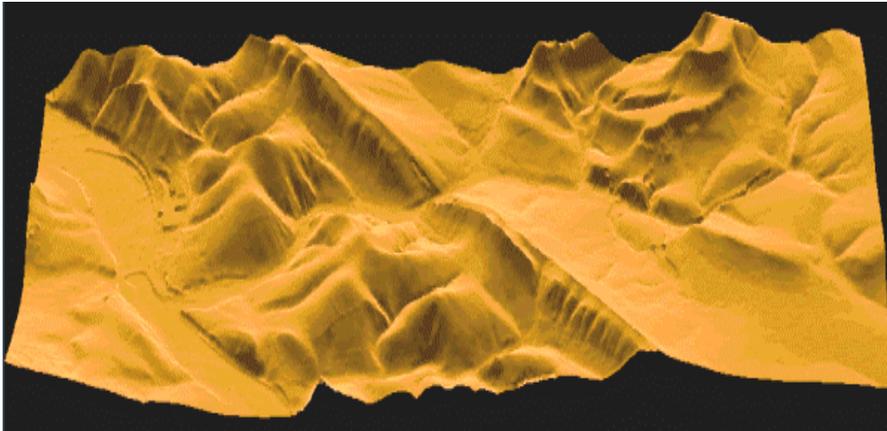
Uso delle curve di livello per rappresentare  
l'andamento altimetrico del terreno

# Costruzione di un DTM

Acquisizione dati (e riduzione ad un unico sistema di riferimento)

Definizione del modello di DTM (e algoritmi di interpolazione)

Presentazione dei dati elaborati in funzione dei prodotti voluti

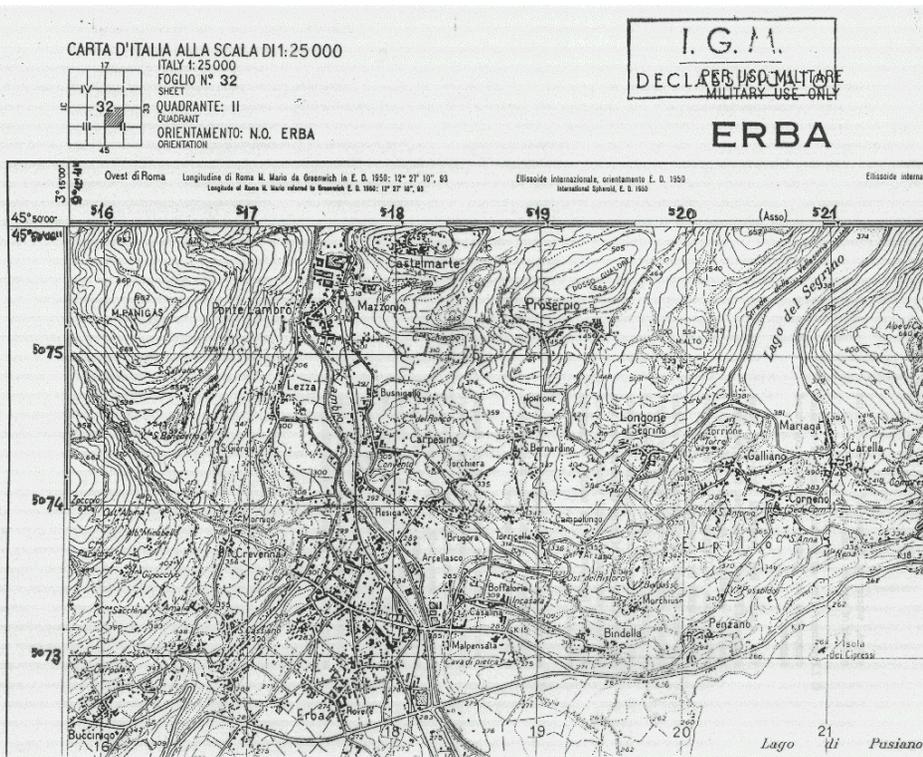


- Modello a griglia regolare
- Modello TIN (Triangulated Irregular Network)

# Acquisizione dati per DTM

	Metodologia	Strumentazione impiegata	Quantità misurabile di dati	Automazione Del metodo	Accuratezza del metodo
Misura della Cartografia	Scansione	Scanner	Elevata	Buona (in modalità semiautomatica)	Media (in funzione di qualità/scala della carta e solo se in modalità semiautomatica)
	Digitalizzazione	Tavolo digitalizzatore	Elevata	Scarsa	Media (in funzione di qualità/scala della carta)
Rilievo Topografico	Topografia Classica	Stazione totale	Media	Nulla	Elevata
	Geodesia Spaziale	GPS	Media	Nulla	Elevata
Rilievo Fotogrammetrico	Approccio Analitico	Stereocomp. analitico	Elevata	Scarsa	Buona/elevata
	Approccio Digitale	Stazione digitale	Molto elevata	Ottima	Buona/elevata
Telerilevamento	Ripresa Spaziale	Elaborazione digitale delle immagini	Elevata	Ottima	Media

# Produzione DTM: acquisizione dei dati - 1



## – Digitalizzazione di cartografia

- Strumentazione: tavolo digitalizzatore
- Accuratezza del metodo: **media** (in funzione di qualità della carta, perizia dell'operatore)

## – Scansione di cartografia

- Strumentazione: scanner
- Accuratezza del metodo: **media** (in funzione di qualità/scala della carta e se in modalità semiautomatica)

# Produzione DTM: acquisizione dei dati - 2



## – Telerilevamento

- Metodo: elaborazione delle immagini digitali
- Accuratezza del metodo: **media**
- Impiegato attualmente solo per DTM a carattere nazionale

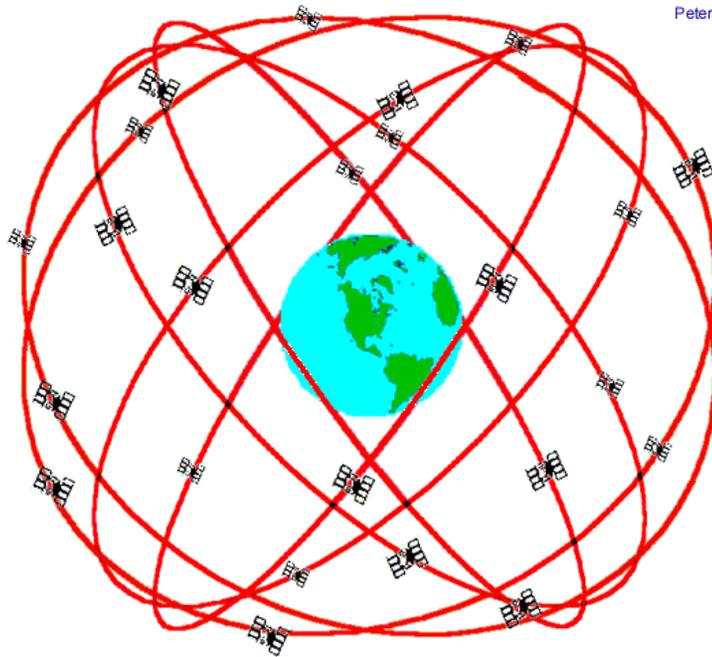
## – Rilievo fotogrammetrico

- Strumentazione: stereocomparatore analitico/stazione digitale
- Accuratezza del metodo: **buona/elevata**

# Produzione DTM: acquisizione dei dati - 3

## – Rilievo topografico

- Metodo: topografia classica (stazione totale) o geodesia spaziale (GPS)
- Accuratezza del metodo: **elevata**
- A causa della bassa produttività del metodo, è adatto per il rilievo di zone limitate (ad esempio cave, frane,...)



Peter H. Dana 9/22/98

**GPS Nominal Constellation**

**24 Satellites in 6 Orbital Planes**

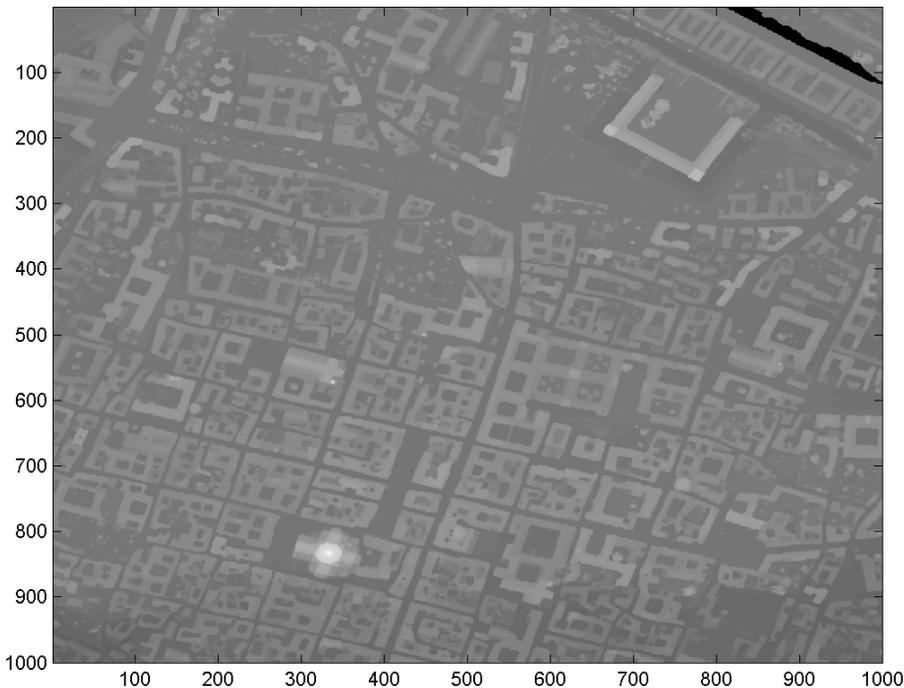
**4 Satellites in each Plane**

**20,200 km Altitudes, 55 Degree Inclination**

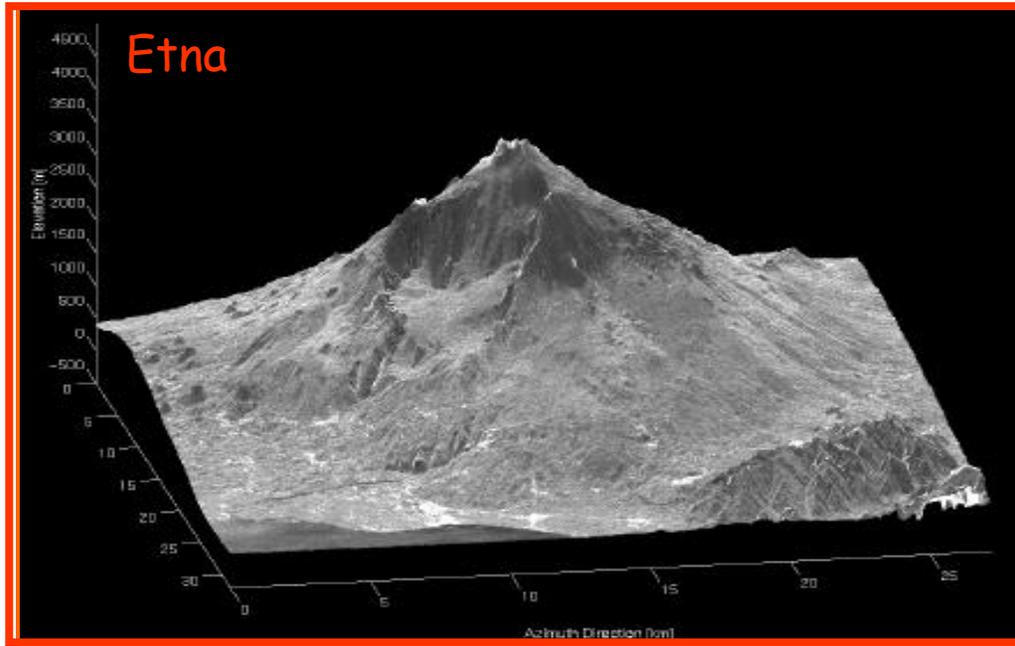
# Produzione DTM: acquisizione dei dati - 4

## – Rilievo LIDAR (Light Detection and Ranging)

- Metodo: sistema laser aviotrasportato, installato a bordo di aerei o elicotteri. I sistemi lidar consistono in un GPS aviotrasportato con relativa stazione base GPS, un'unità di misure inerziali e un laser a scansione.
- Accuratezza del metodo: **elevata**
- Tecnica recente. Primi risultati disponibili.

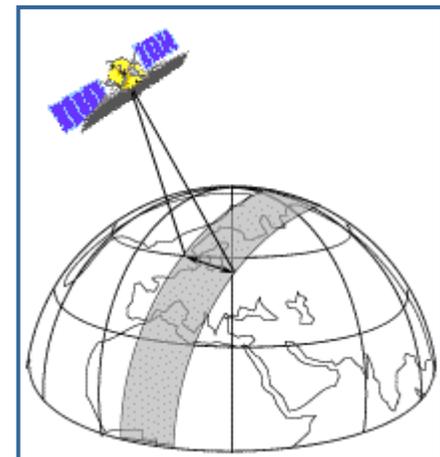


# Produzione DTM: acquisizione dei dati - 5



## – SAR

- Metodo: impiego geometrico del radar interferometrico
- Accuratezza del metodo: **media** (10 m)
- Tecnica recente. Primi risultati disponibili.



# Precisione del DTM

## Livello 5

### Caratteristiche

- precisione in altezza  $\pm 0.3$  m
- spaziatura dei punti della griglia 5 m
- bias  $< 0.08$  m
- accuratezza planimetrica dei punti misurati e degli elementi lineari  $\pm 0.3$  m
- break lines per oggetti che provocano irregolarità del terreno superiori a 0.3 m
- delimitazione delle zone morte e delle zone di minor precisione

# Precisione del DTM

## Livello 5

### Applicazioni

- ortofoto a grande scala fino a 1: 500
- applicazioni ingegneristiche
- modellazione idraulica degli alvei di piena

### Zone di applicazione

- zone con pendenza media minore dell' 1% e rischio di inondazione
- zone da cartografare a scala 1:500

**DATI : Laser scanning + controllo fotogrammetrico, carta  
tecnica 1 : 500**

# Precisione del DTM

## Livello 4

### Caratteristiche

- precisione in altezza  $\pm 0.3$  m
- spaziatura dei punti della griglia 5 m
- bias  $< 0.15$  m
- accuratezza planimetrica dei punti misurati e degli elementi lineari  $\pm 0.3$  m
- break lines per oggetti che provocano irregolarità del terreno superiori a 0.6 m
- delimitazione delle zone morte come case, superfici d'acqua e zone di minor precisione, come quelle coperte da vegetazione folta.

# Precisione del DTM

## Livello 4

### Applicazioni

- ortofoto a grande scala fino a 1: 1 000
- pianificazione
- ingegneria

### Zone di applicazione

- zone urbane e zone di espansione
- zone a forte sviluppo
- zone da cartografare a scala 1: 1 000

**DATI : Laser scanning + controllo fotogrammetrico, carta tecnica  
1 : 1 000**

# Precisione del DTM

## Livello 3

### Caratteristiche

- precisione in altezza  $\pm 1$  m
- spaziatura dei punti della griglia 10 m
- bias  $< 0.5$  m
- break lines per oggetti che causano irregolarità sul terreno maggiori di 2 m (rive di fiumi, laghi, mare, ponti, ...)

### Applicazioni

- ortofoto a scala 1: 5 000/ 1: 10 000, cartografia , studi ambientali

### Zone di applicazione

- zone urbane, zone di grande sviluppo costruttivo, aree da cartografare a scala 1: 1 000

**DATI : Laser scanning + controllo fotogrammetrico, carte tecniche almeno 1 : 5 000**

# Precisione del DTM

## Livello 2

### Caratteristiche

- precisione in altezza  $\pm 2$  m
- spaziatura dei punti della griglia 20 m
- bias  $< 1$  m
- break lines per oggetti che causano irregolarità maggiori di 4 m (linee costiere, rive dei laghi, del mare,...)

### Applicazioni

- ortofoto a scala **1: 10 000**, studi ambientali, idraulici,...

### Zone di applicazione

- zone montagnose con sfruttamento agricolo estensivo
- zone in cui non sia disponibile un DEM più accurato

**DATI : Laser scanning + controllo fotogrammetrico, carte tecniche almeno 1 : 10 000**

# Precisione del DTM

## Livello 1

### Caratteristiche

- precisione in altezza  $\pm 5$  m
- spaziatura dei punti della griglia 20 m
- bias  $< 2.5$  m
- break lines per linee costiere, laghi, mare, viadotti più alti di 10 m.

### Applicazioni

- ortofoto a bassa precisione alla scala 1: 10 000, studi ambientali

### Zone di applicazione

- zone montagnose con modesti insediamenti e sfruttamento agricolo estensivo
- zone in cui non sia disponibile un DEM più accurato

**DATI : DTM regioni, DTM IGM , dati AIMA e IT2000, carte  
tecniche 1: 10 000**

# Precisione del DTM

## Livello 0

### Caratteristiche

- precisione in altezza  $\pm 10$  m
- spaziatura dei punti della griglia 20 m
- bias  $< 5$  m
- break lines per linee costiere e laghi

### Applicazioni

- ortofoto a bassa precisione alla scala 1: 10 000, studi ambientali

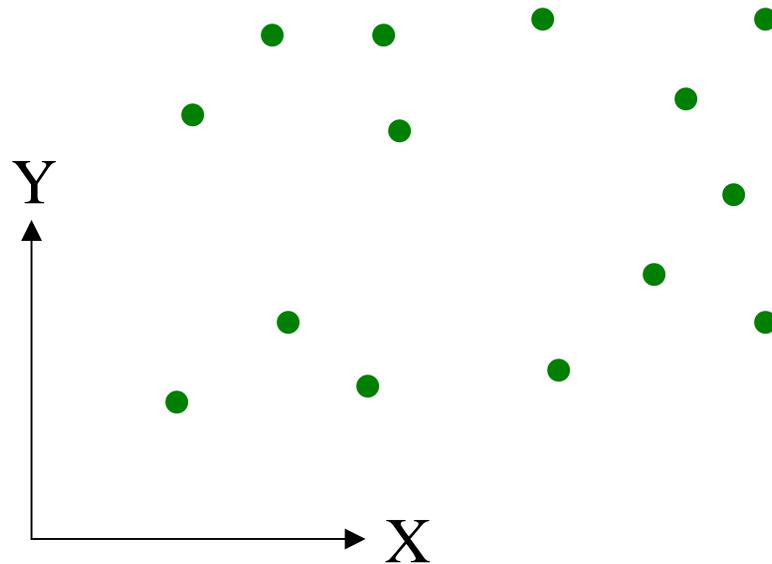
### Zone di applicazione

- DTM primario su tutto il territorio nazionale (dove non disponibile altro)

## **DATI: DTM a bassa precisione IGM**

# DTM a griglia regolare (a matrice)

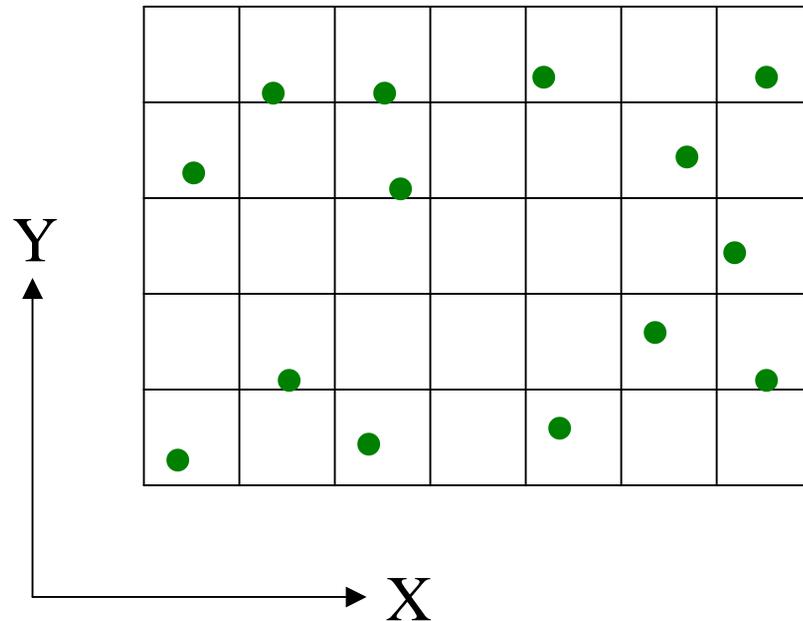
- I dati (quote terreno) sono acquisiti in modo irregolare



# DTM a griglia regolare (a matrice)

- I dati (quote terreno) sono acquisiti in modo irregolare

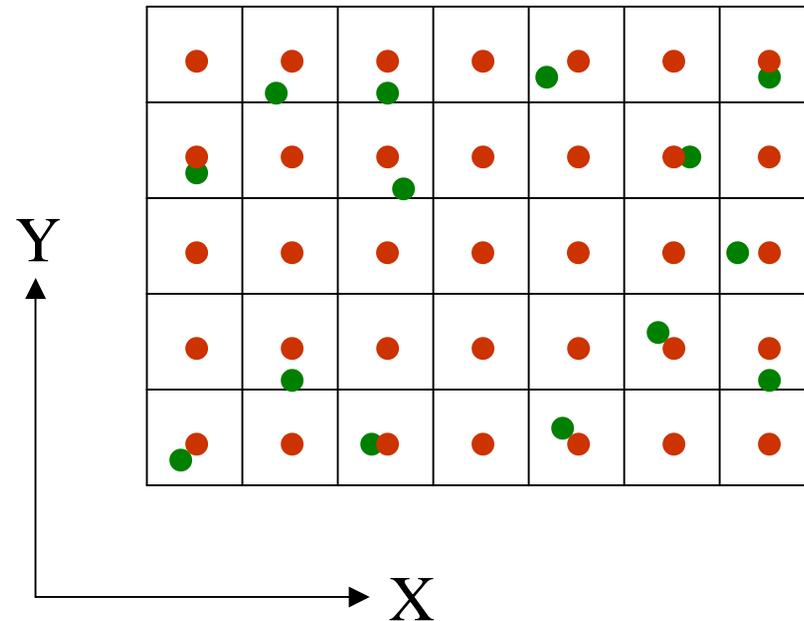
- I valori delle quote del terreno vanno determinati secondo una griglia regolare



# DTM a griglia regolare (a matrice)

● I dati (quote terreno) sono acquisiti in modo irregolare

● I valori delle quote del terreno vanno determinati secondo una griglia regolare: ciò è possibile grazie ad **algoritmi di interpolazione**



# DTM a griglia regolare

## Vantaggi

- L'organizzazione dei dati è molto semplice, basta fissare:
  - **origine** (coordinate tipo X, Y)
  - **passo della griglia** (solitamente  $\Delta X = \Delta Y$ )e registrare la quota dei punti posizionati al centro delle celle della griglia
- Le elaborazioni del modello sono piuttosto facili
- E' più facile eseguire confronti fra diversi DTM

# DTM a griglia regolare

## Svantaggi

- Gli algoritmi di interpolazione presentano comportamenti “anomali” in corrispondenza dei bordi della griglia
- Occorre fare attenzione alla ricerca del passo ottimale della griglia
- Nel caso di terreno uniforme i dati possono rivelarsi ridondanti e viceversa

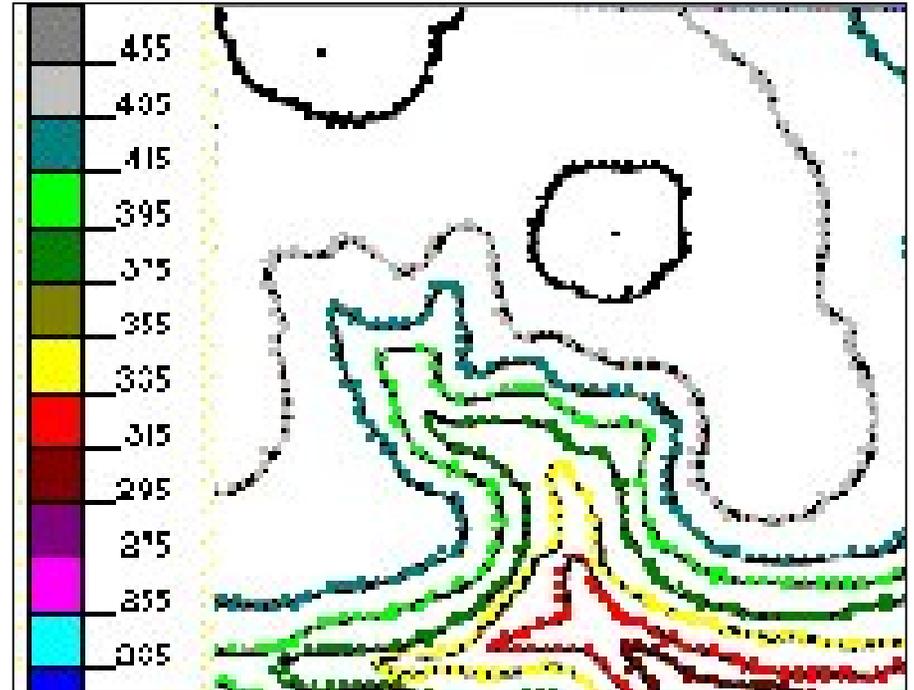
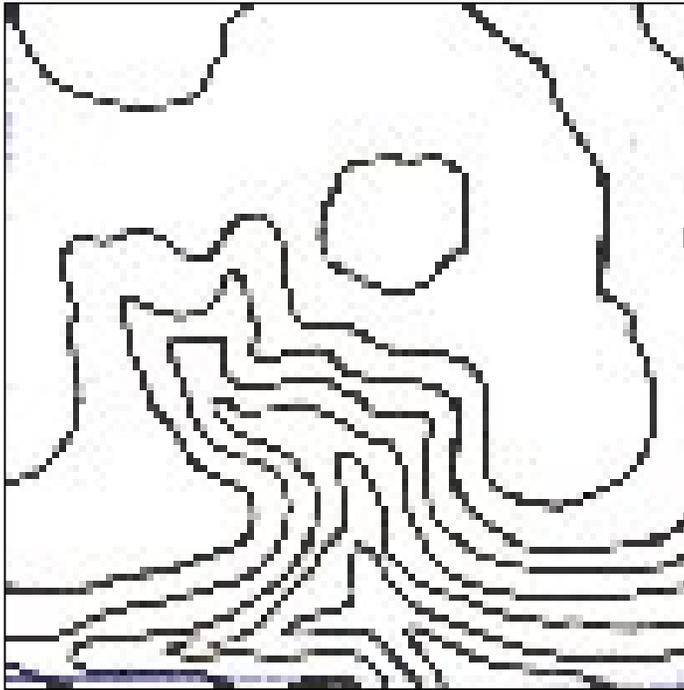


**Soluzione: griglia a passo variabile**  
(**campionamento progressivo**)

il passo della griglia varia a seconda della **variabilità locale** del terreno

Per ogni punto del modello si registrano le coordinate  $X, Y, h$

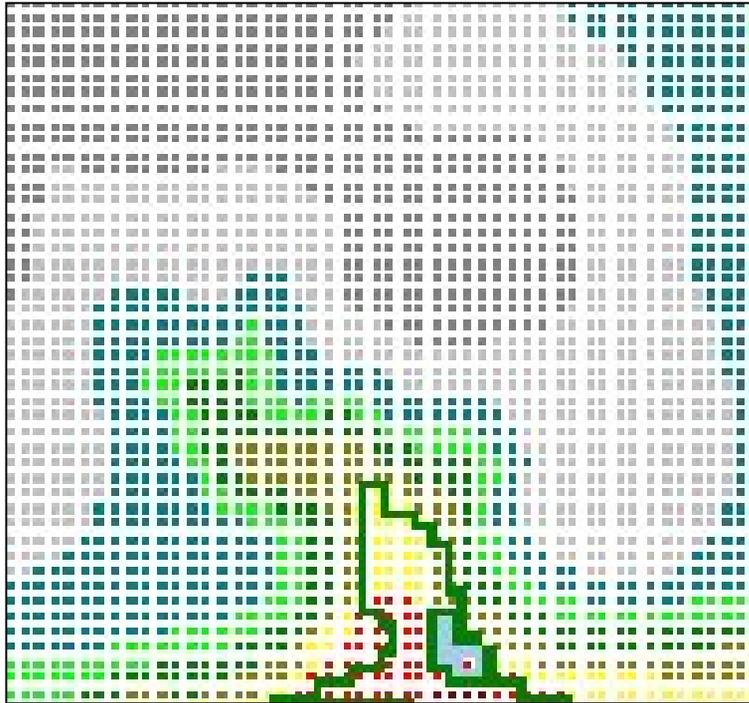
# Esempio di costruzione di DTM



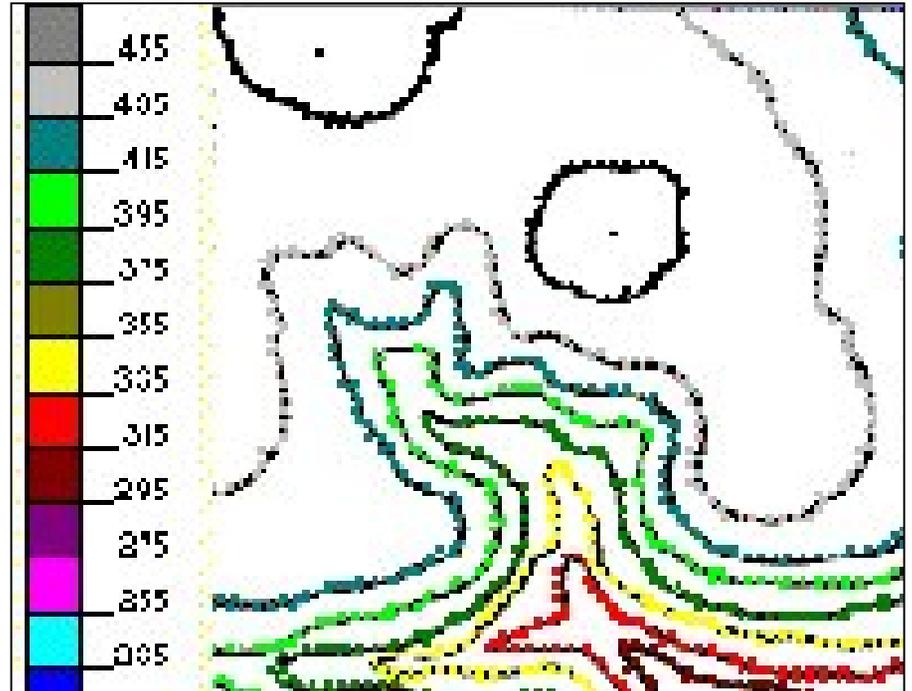
Carta a curve di livello  
→ digitalizzazione:  
ottengo un file vector

Conversione vector → raster:  
dati solo in corrispondenza delle  
curve di livello

# Esempio di costruzione di DTM

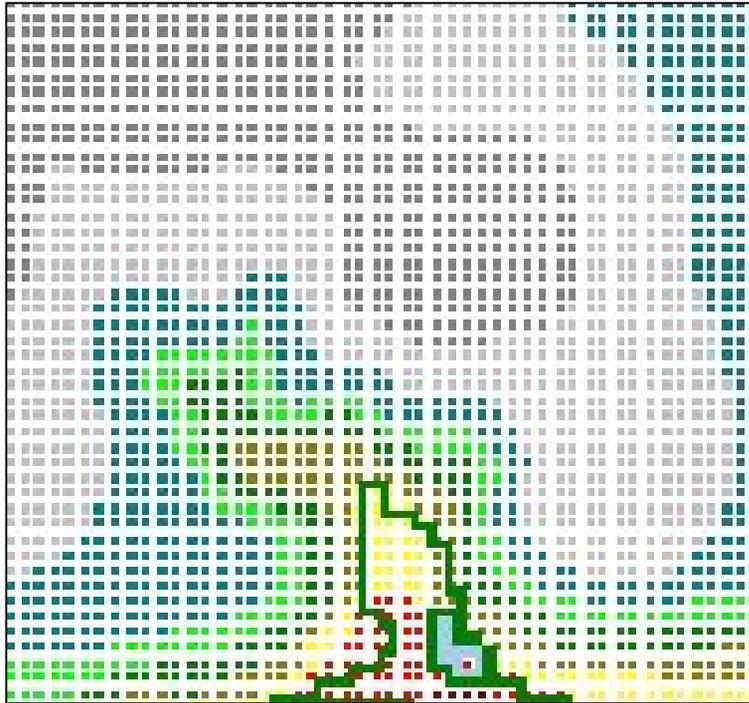


Interpolazione e creazione di una griglia completa



Conversione vector → raster:  
dati solo in corrispondenza delle  
curve di livello

# Esempio di costruzione di DTM



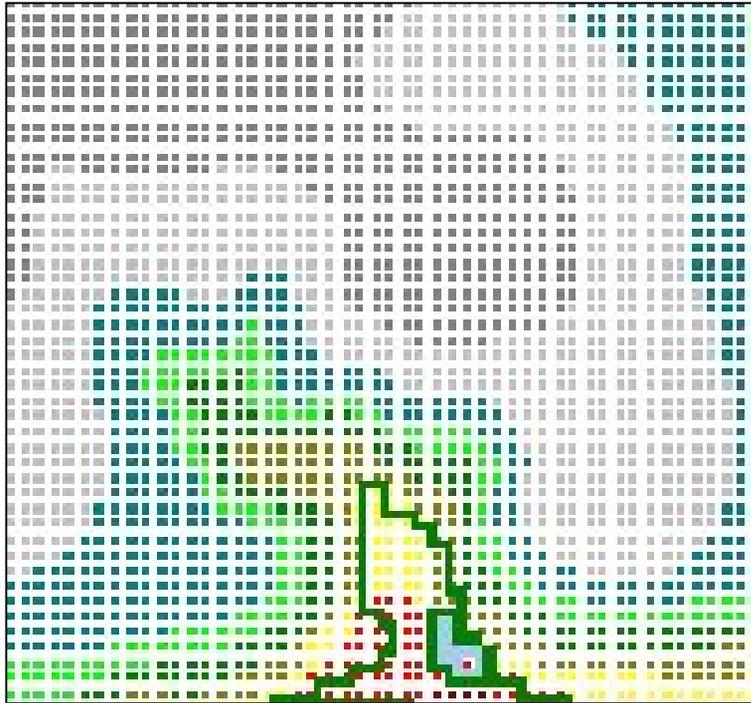
=

283	287	285	292	293	294	293
■	■	■				
272	276	277	281	282	283	282
■	■	■				
261	268	272	274	274	274	273
■	■					
250	254	259	263	264	263	261
246	247	248	250	250	250	250
243	241	240	239	239	240	242
242	238	233	230	230	232	235
			■	■	■	

Interpolazione e creazione  
di una griglia completa

Struttura matematica della griglia  
del DTM = matrice di numeri

# Esempio di costruzione di DTM

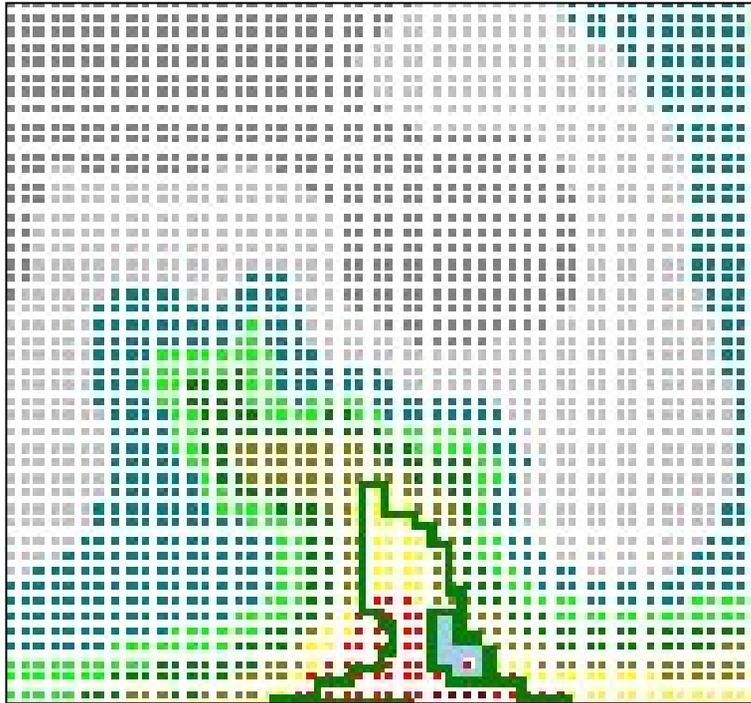


Interpolazione e creazione  
di una griglia completa

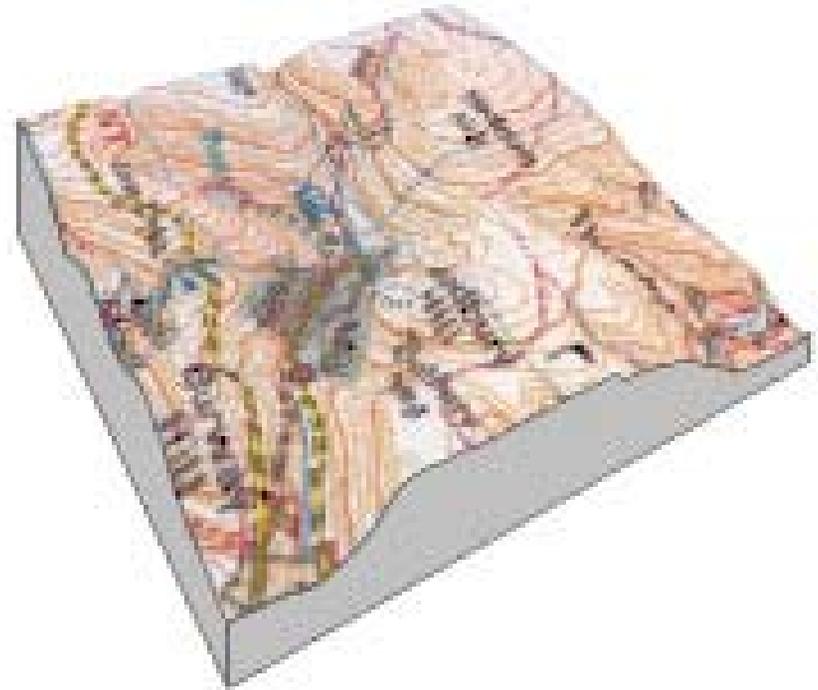


Visualizzazione prospettica del  
DTM (opportuno *software*)

# Esempio di costruzione di DTM

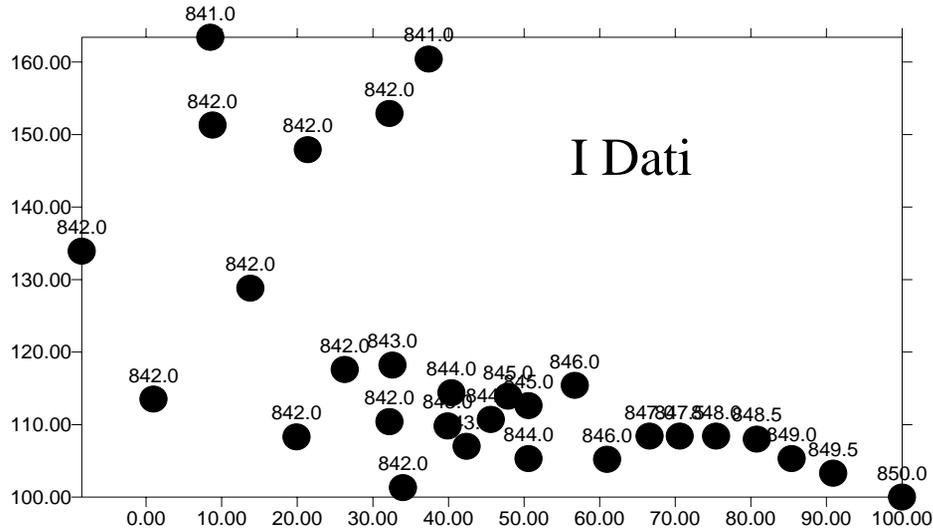


Interpolazione e creazione  
di una griglia completa



Visualizzazione prospettica del  
DTM (opportuno *software*) e  
sovrapposizione della cartografia

# Esempio di costruzione di DTM

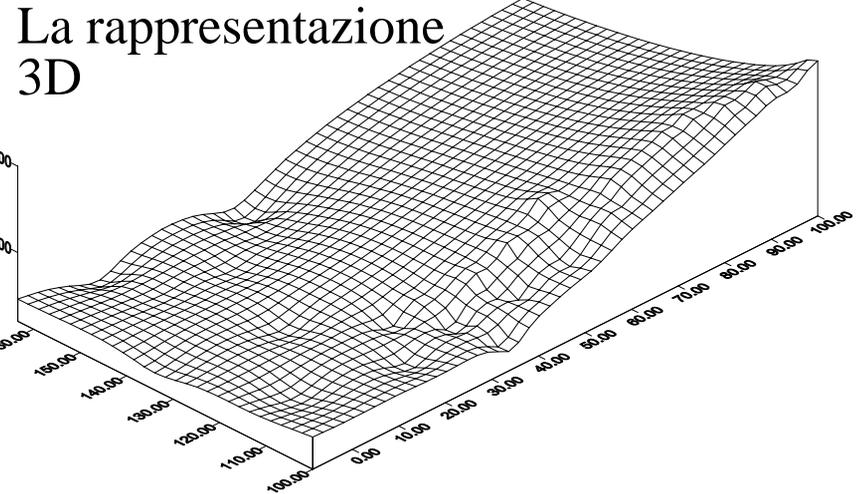
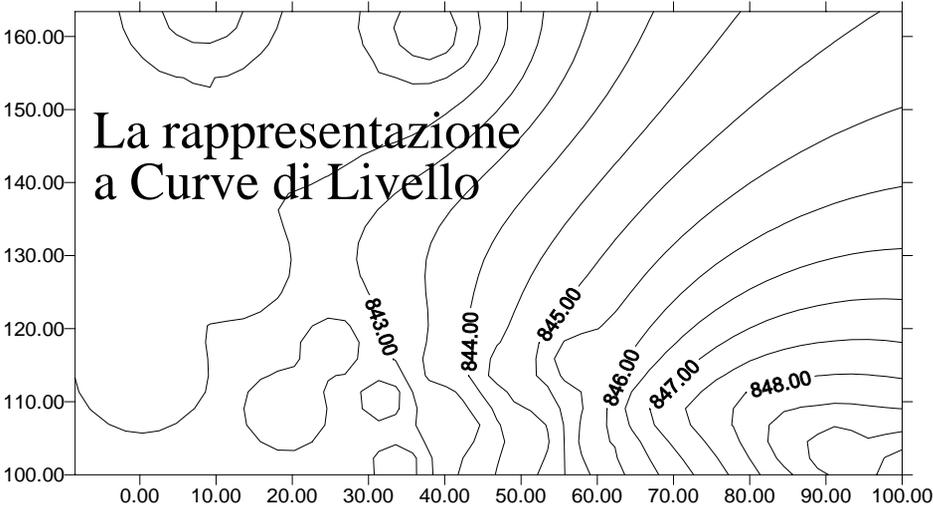


DSAA  
50 29  
-8.5 100  
100 163.4  
841.014 850  
842.872 842.846 842.826 842.814 842.811 842.818 842.829 842.839 842.842 842.832  
842.811 842.787 842.774 842.784 842.815 842.839 842.815 842.696 842.428 842.143  
842.371 842.916 843.314 843.581 843.807 844.019 844.208 844.397 844.654 844.99  
845.344 845.641 845.87 846.099 846.352 846.604 846.846 847.082 847.321 847.57  
847.836 848.114 848.374 848.615 848.892 849.066 849.074 849.254 849.737 850

Il Grigliato numerico

842.798 842.762 842.731 842.711 842.706 842.716 842.737 842.756 842.762 842.745  
842.705 842.65 842.606 842.612 842.674 842.743 842.757 842.669 842.42 842.101  
842.368 842.945 843.294 843.504 843.73 843.974 844.138 844.264 844.554 844.997  
845.467 845.8 845.969 846.2 846.493 846.765 847.01 847.246 847.482 847.733  
848.013 848.329 848.627 848.807 849.177 849.428 849.233 849.196 849.521 849.749

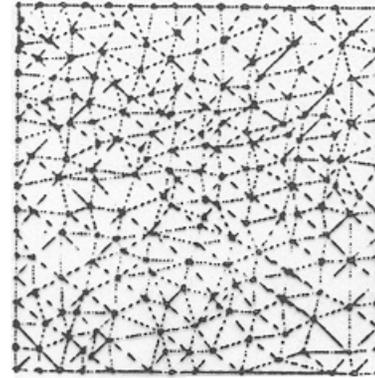
842.721 842.67 842.623 842.59 842.579 842.596 842.633 842.67 842.686 842.667  
842.603 842.498 842.389 842.37 842.491 842.641 842.71 842.691 842.618 842.586  
842.785 843.096 843.262 843.326 843.599 843.942 844.067 844.059 844.446 845.003  
845.586 845.963 846.016 846.323 846.683 846.959 847.195 847.426 847.658 847.89  
848.174 848.477 848.903 848.92 849.127 849.393 849.191 849.047 849.145 849.26



Modelli Digitali del Terreno

# TIN Triangulated Irregular Network

triangolazione di un insieme di punti



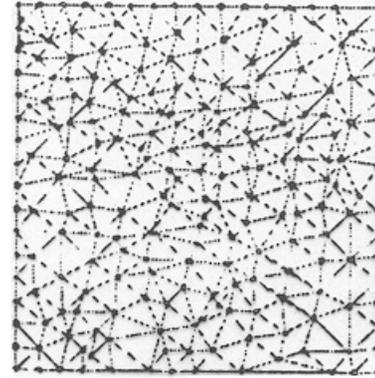
Si “triangolano” i punti campionati.

# TIN

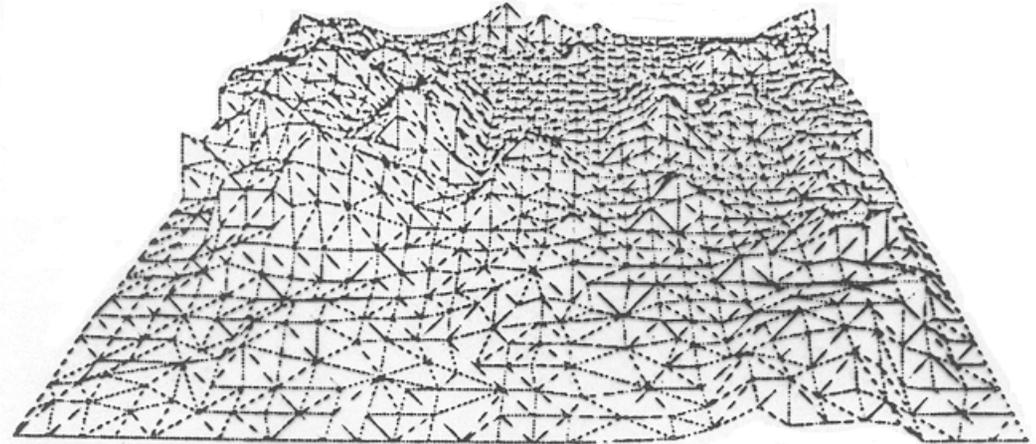
## Triangulated Irregular Network

Si “triangolano” i punti campionati.  
Ne risulta un modello del terreno a **facce triangolari**, solitamente considerate **piane**, che però possono essere anche rappresentate da superfici più complesse.

triangolazione di un insieme di punti



ogni punto ha una quota



# Costruzione di un TIN

- Si **codifica** ogni vertice di triangolo
- Se ne **registra la posizione** in planimetria ( $X$ ,  $Y$ ) e quota ( $h$ )
- I punti che fanno parte di un TIN sono:
  - **punti originariamente rilevati**,
  - altri **punti significativi** del terreno, scelti da una preesistente rappresentazione (es. grigliato regolare)

## Vantaggi

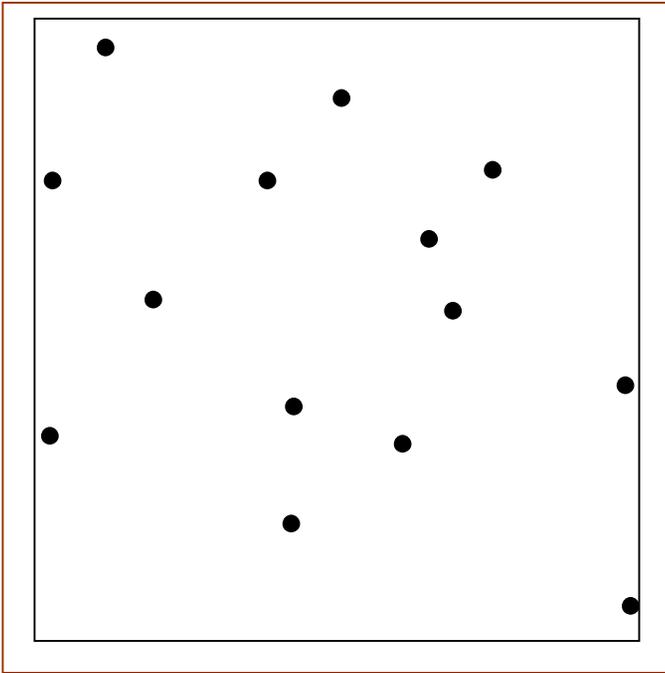
- L'insieme delle osservazioni originali fa parte dei dati
- La densità dei punti corrisponde ai dati originariamente osservati

## Svantaggi

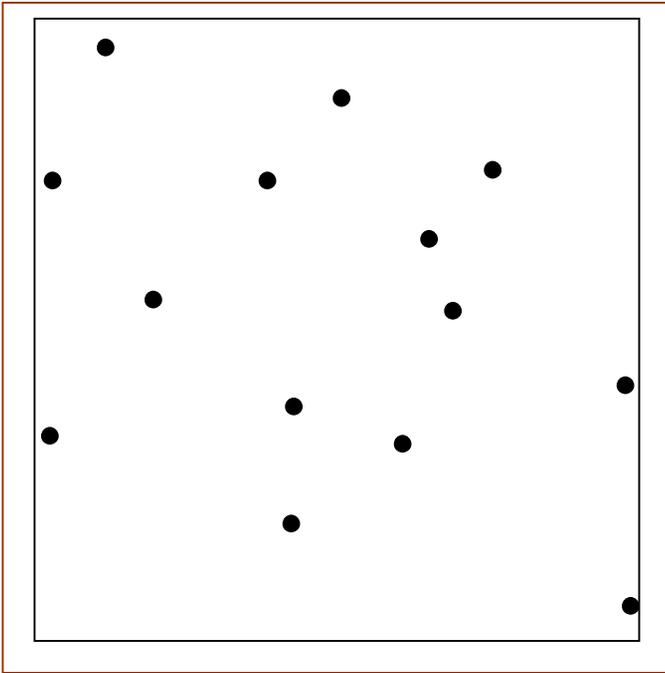
- Struttura dati non semplice
- Complessità degli algoritmi di triangolazione

# Creazione di una rete irregolare di triangoli

- Si parte da un insieme di punti sparsi.

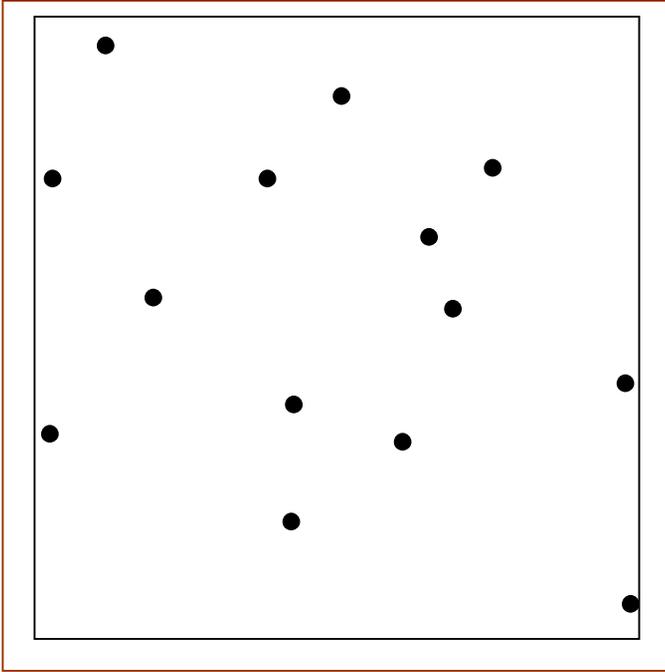


# Creazione di una rete irregolare di triangoli



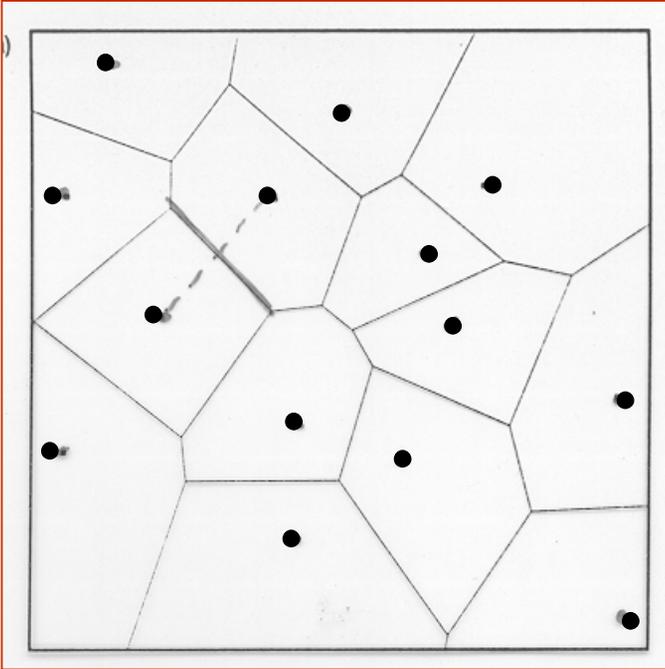
- Si parte da un insieme di punti sparsi.
- Si devono **definire in modo univoco** dei triangoli, che abbiano inoltre la proprietà di essere il più possibile equiangoli.

# Creazione di una rete irregolare di triangoli



- Si parte da un insieme di punti sparsi.
- Si devono **definire in modo univoco** dei triangoli, che abbiano inoltre la proprietà di essere il più possibile equiangoli.
- In questo modo si avranno triangoli veramente **rappresentativi** della superficie che si vuole rappresentare e sarà possibile **replicare il risultato finale**.

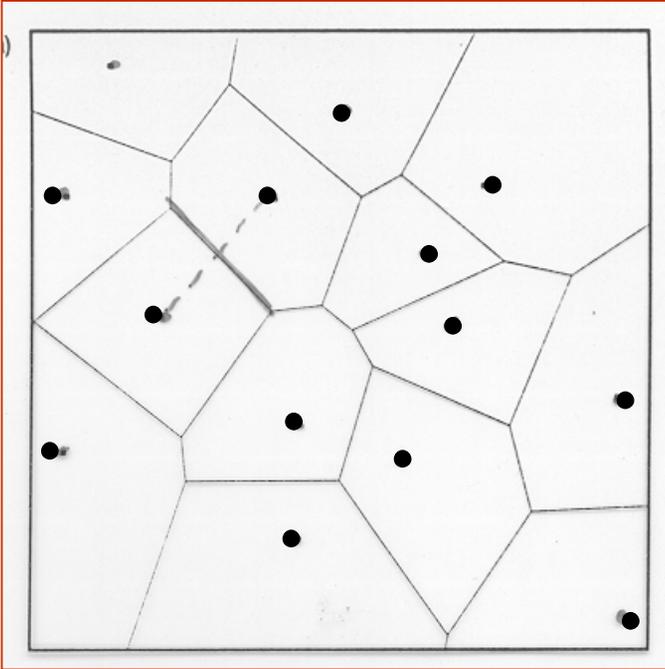
# Creazione di una rete irregolare di triangoli



**Tessellazione di Dirichlet** di un insieme di punti: li partiziona in modo univoco in un insieme di poligoni, detti **poligoni di Thiessen** (o **diagramma di Voronoi**).

- Si parte da un insieme di punti sparsi.
- Si devono **definire in modo univoco** dei triangoli, che abbiano inoltre la proprietà di essere il più possibile equiangoli.
- In questo modo si avranno triangoli veramente **rappresentativi** della superficie che si vuole rappresentare e sarà possibile **replicare il risultato** finale.

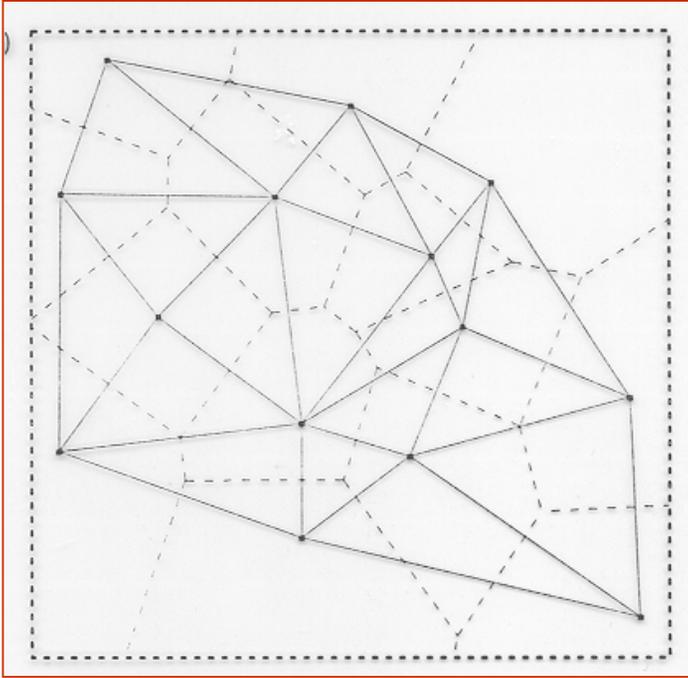
# Creazione di una rete irregolare di triangoli



- I poligoni di Thiessen definiscono regioni dello spazio nelle quali qualunque posizione è più vicina al punto interno al poligono che a qualunque altro punto.

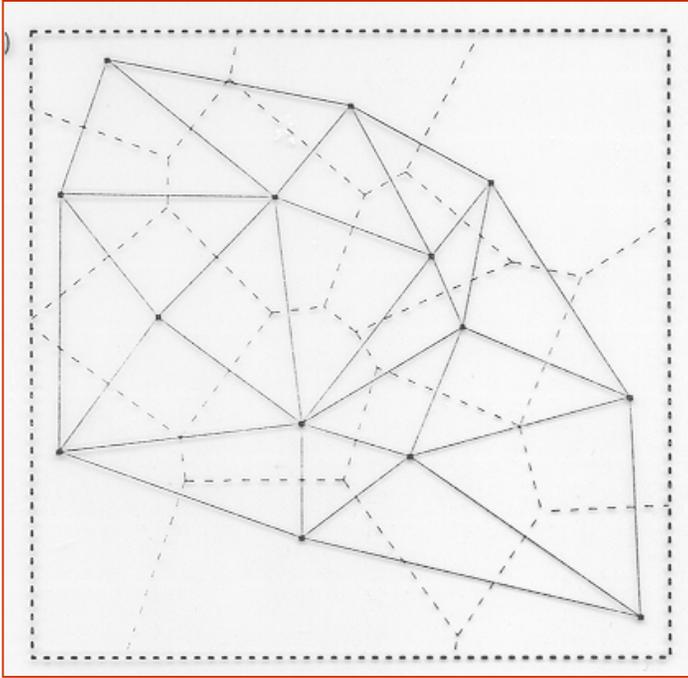
**Tessellazione di Dirichlet** di un insieme di punti: li partiziona in modo univoco in un insieme di poligoni, detti **poligoni di Thiessen** (o **diagramma di Voronoi**).

# Creazione di una rete irregolare di triangoli



**Triangolazione di Delauney**  
si ottiene unendo i punti  
interni dei poligoni adiacenti

# Creazione di una rete irregolare di triangoli



**Triangolazione di Delauney**  
si ottiene unendo i punti  
interni dei poligoni adiacenti

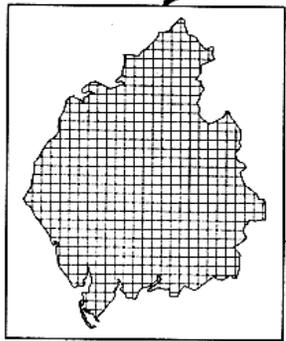
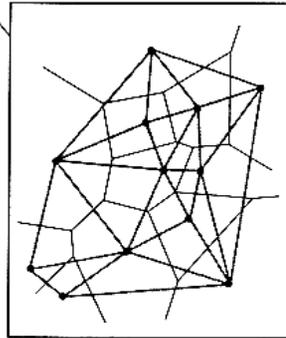
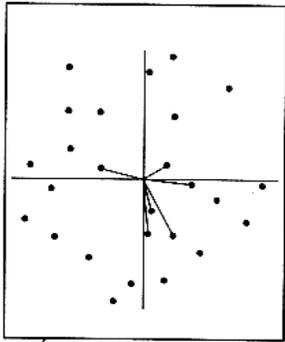
- La triangolazione di Delauney è **unica**, indipendentemente dal punto di partenza
- I triangoli che ne risultano hanno la caratteristica di essere il più possibile **equiangoli**
- Una circonferenza passante per i tre vertici di un triangolo non contiene nessun altro vertice della triangolazione



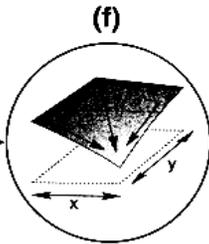
**Superficie da rappresentare**

**Algoritmo di interpolazione**

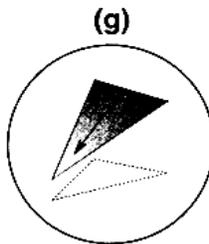
**Algoritmo di triangolazione**



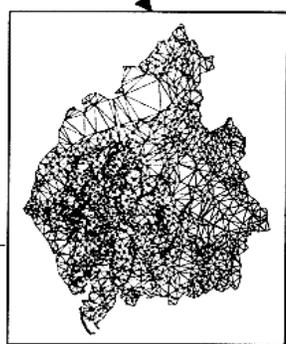
(d)



(f)



(g)



(e)

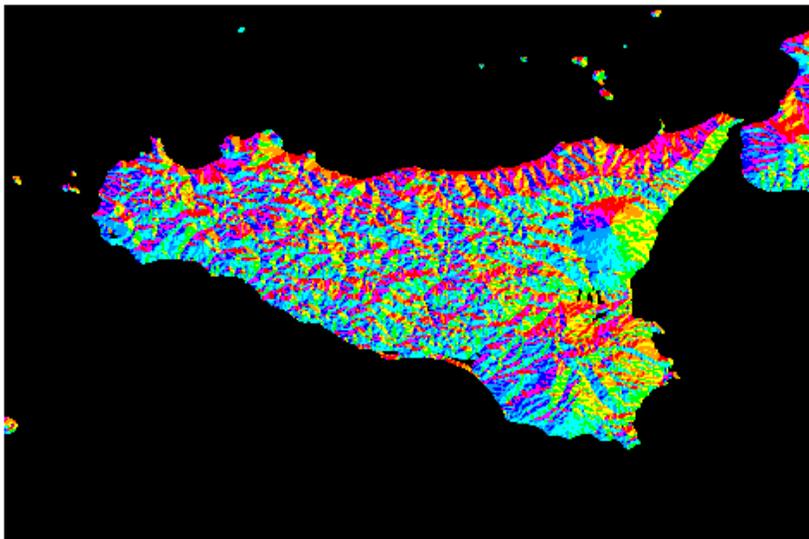
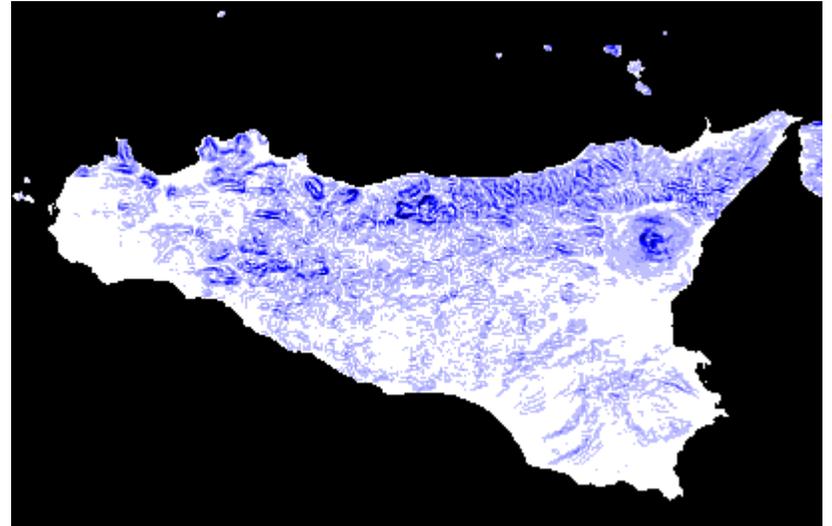
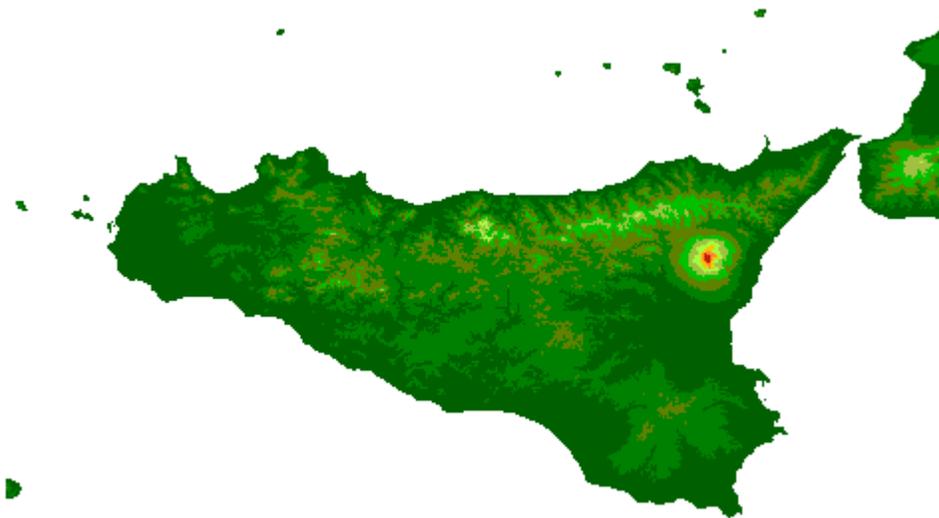
**Rappresentazione a griglia regolare o a TIN**

Modelli Digitali del Terreno

# Applicazioni dei DTM

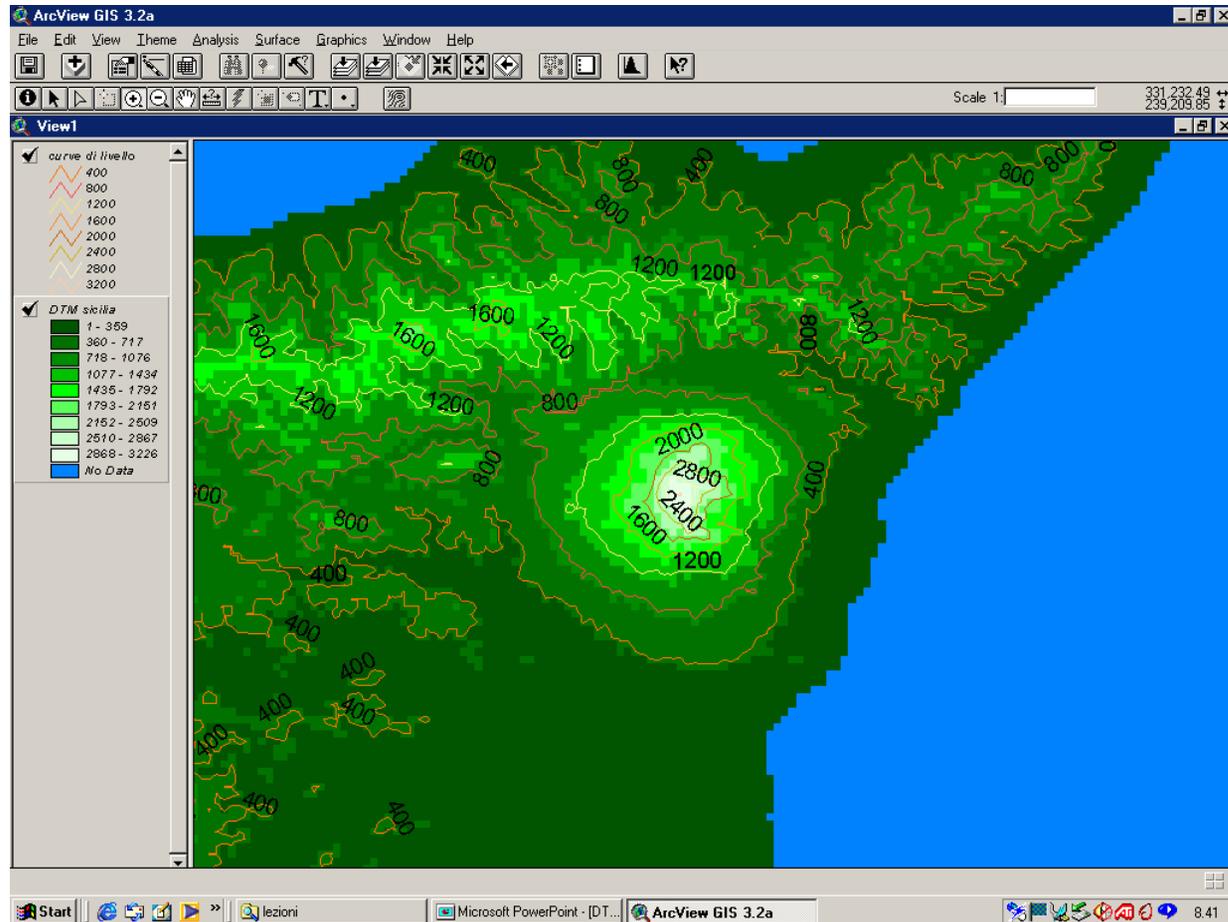
- **analisi idrologiche** (per predire il flusso dell'acqua sulla superficie terrestre e determinare quindi le aree di raccolta, il volume dei fiumi, le zone soggette a rischio allagamento);
- **analisi del suolo** (per predire la stabilità del suolo in base ai gradienti della superficie del terreno);
- **radiocomunicazioni** (per valutare l'effetto della topografia nelle trasmissioni radio);
- **ingegneria civile** (per la progettazione di manufatti e la valutazione del volume del terreno da rimuovere);
- **geologia** (per interpretare dati sotto la superficie terrestre congiuntamente a rilievi sismici e informazione da trivellazioni);
- **architettura** (per avere una visione del territorio e valutare l'impatto delle infrastrutture).

# Grandezze derivate da un DTM



# Carta delle altezze

Modello digitale del terreno (100m x 100m) Monte Etna



Modelli Digitali del Terreno

# Pendenze

Una superficie **grigliata** (quale è un DTM) si suppone che sia ricavata da una superficie matematicamente **continua**  $\Rightarrow$  è sempre possibile calcolarne la derivata in ogni direzione.

Le derivate del I ordine della superficie sono le **PENDENZE** (o SLOPE)

DEF: **SLOPE** = piano tangente alla superficie modellata dal DTM

si definiscono due componenti:

- ★ **GRADIENT** = massima percentuale di variazione di altezza
- ★ **ASPECT** = direzione di questo massimo cambiamento

Uno dei metodi per calcolare la pendenza in un punto è quello delle differenze finite (= discretizzazione della derivata prima)

# Pendenze

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Siano **a b c d e f g h i** i valori del DTM in una finestra di dimensioni 3x3.

Siano  $\Delta x$   $\Delta y$  le dimensioni della singola cella.

Si calcolano:

**gradiente est/ovest**

$$\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_e = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + g)}{8\Delta x}$$

**gradiente nord/sud**

$$\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_e = \frac{(a + 2b + c) - (g + 2h + i)}{8\Delta y}$$

# Pendenze

La pendenza  $S$  è data dal modulo del gradiente della superficie:

$$tgS = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \Rightarrow S = artg \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}$$

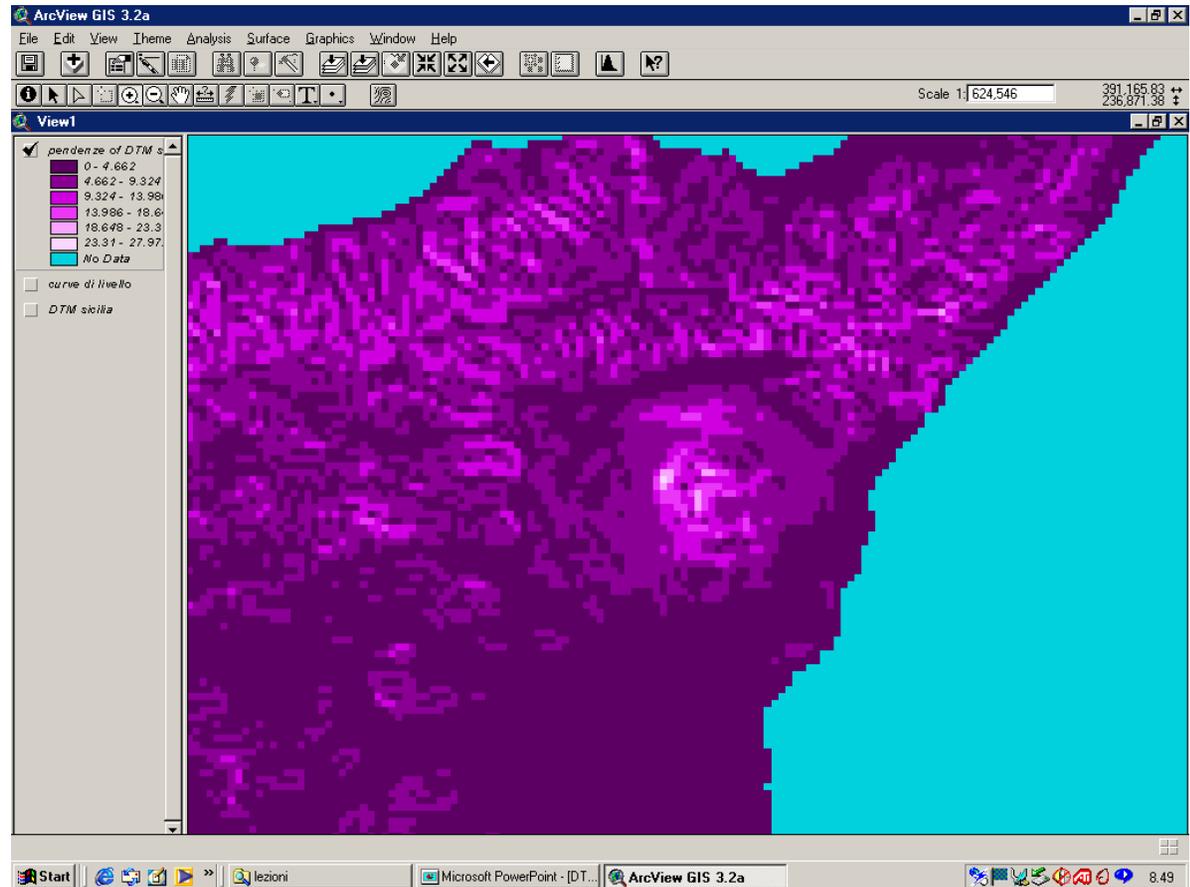
Sul bordo del DTM ci sono effetti numerici che vanno controllati e valutati: non sempre l'algoritmo di calcolo usato all'interno di un GIS è descritto nel dettaglio.

OSS: In ArcView le operazioni trigonometriche sono sempre in radianti

# Carta delle pendenze

Carta delle pendenze  
del Monte Etna  
(dal DTM 100m x 100m)

$$S = \text{artg} \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}$$



# Esposizioni

La funzione ASPECT individua un piano passante per il valore  $z$  al centro di una cella 3x3.

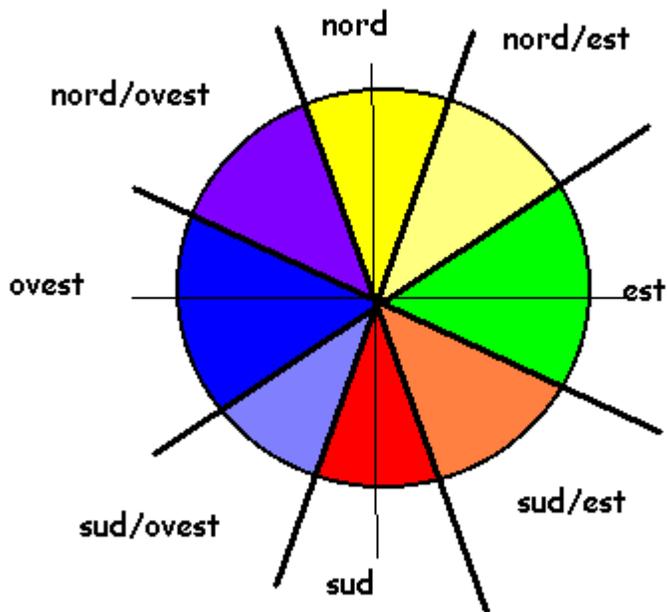
Algoritmo usato: metodo delle differenze finite

$$Aspect = \frac{\partial z / \partial x}{\partial z / \partial y}$$

Le derivate sono calcolate con la stessa espressione usate per il calcolo delle pendenze

# Esposizioni

La funzione ASPECT rappresenta l'esposizione geografica dei versanti di una superficie

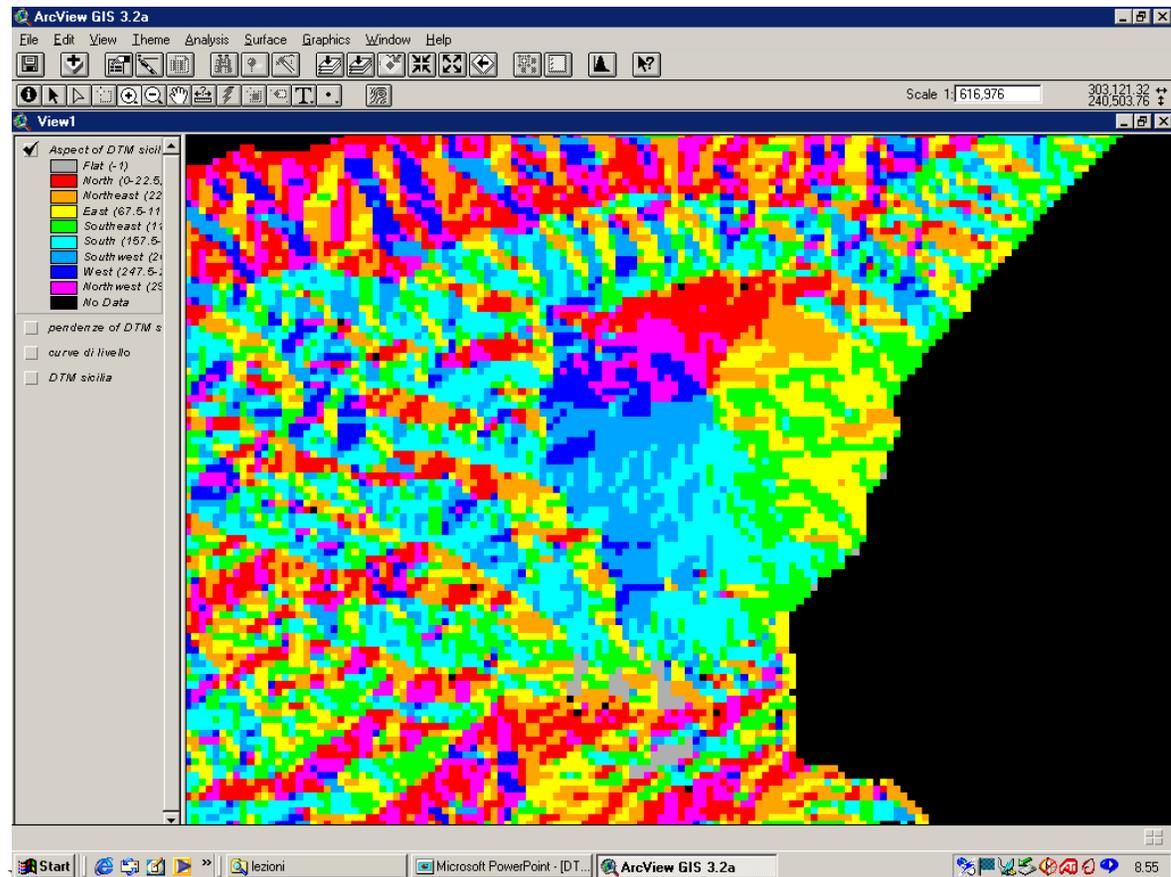


0-22.5,337.5-360	↓ nord
22.5-67.5	↓ nord/est
67.5-112.5	↓ est
112.5-157.5	↓ sud/est
157.5-202.5	↓ sud
202.5 - 247.5	↓ sud/ovest
247.5-292.5	↓ ovest
292.5-337.5	↓ nord/ovest

# Carta delle esposizioni dei versanti

Esposizione dei versanti Monte Etna  
(dal DTM 100m x 100m)

$$\textit{Aspect} = \frac{\partial z / \partial x}{\partial z / \partial y}$$



# Carta con i versanti illuminati - Hillshade

The screenshot displays the ArcView GIS 3.2a interface. The main window, titled 'View1', shows a grayscale Hillshade map of Sicily, where terrain elevation is represented by varying shades of gray. The map is rendered with a perspective view, showing the island's topography. On the left side, a legend titled 'Hillshade of DTM sicil' is visible, listing elevation ranges from 105 to 235 meters, each associated with a specific grayscale swatch. Below the legend, several other map layers are listed but are currently unchecked: 'Aspect of DTM sicil', 'pendenze of DTM s', 'curve di livello', and 'DTM sicilia'. The top of the window features a menu bar with options like File, Edit, View, Theme, Analysis, Surface, Graphics, Window, and Help. A toolbar with various GIS tools is located below the menu bar. The status bar at the bottom right of the window indicates a scale of 1:1,703,387 and coordinates 122,933.36 and 269,471.32. The Windows taskbar at the bottom shows the Start button, several open applications including 'lezioni' and 'Microsoft PowerPoint - [DT...', and the ArcView GIS 3.2a application icon. The system clock in the bottom right corner shows the time 8.57.

ArcView GIS 3.2a

File Edit View Theme Analysis Surface Graphics Window Help

Scale 1:1,703,387 122,933.36 269,471.32

View1

Hillshade of DTM sicil

- 105 - 166
- 167 - 173
- 174 - 176
- 177 - 179
- 180 - 181
- 182 - 184
- 185 - 188
- 189 - 194
- 195 - 235
- No Data

Aspect of DTM sicil

pendenze of DTM s

curve di livello

DTM sicilia

Start | lezioni | Microsoft PowerPoint - [DT... | ArcView GIS 3.2a | 8.57