

I modelli dei dati:
Vector, Raster e TIN

PROF. ALBERTO GUARNIERI

Modelli dei dati



Il mondo reale che noi percepiamo con i nostri sensi può essere considerato come costituito di oggetti, dotati di certe proprietà, i quali interagiscono tra di loro.

Studiare il mondo reale significa studiarne gli oggetti e il modo con cui questi oggetti interagiscono.

La rappresentazione di entità del mondo reale e dei reciproci meccanismi di interazione tramite strumenti matematici prende il nome di **modellazione**.

Applicare la modellazione nell'ambito di un SIT significa interpretare l'informazione geografica (il mondo reale) secondo delle rappresentazioni (modelli) che ne evidenzino le caratteristiche utili a capire determinati fenomeni.

L'impiego di un modello comporta:

- la definizione di una **struttura dei dati** adeguata;
- una rappresentazione **semplificata** (approssimata) del mondo reale.

La scelta di una struttura dei dati geografici dipende:

- dalle particolari esigenze dell'utilizzatore (obiettivi dello studio),
- dagli strumenti con cui vengono acquisite le informazioni,
- da specifiche esigenze di rappresentazione dei dati,
- dalle tipologie di algoritmi di elaborazione disponibili nei software GIS.

La rappresentazione di oggetti del mondo reale è imperfetta perchè:

- la nostra conoscenza delle entità e delle loro caratteristiche è incompleta,
- gli strumenti logici, matematici e informatici che usiamo sono limitati,
- i modelli sono progettati per evidenziare solo determinati aspetti della realtà, quelli che noi consideriamo utili alle nostre analisi.

Ai fini della modellazione, gli elementi geografici del mondo reale possono essere distinti secondo due tipi fondamentali:

- **Oggetti**
- **Fenomeni**

Gli oggetti sono entità fisiche (come edifici, strade, acquedotti, ecc.) oppure entità giuridiche (come stati, comuni, proprietà, ecc.),

- hanno un limite individuabile,
- possono essere considerate come entità **discrete**.

I fenomeni sono eventi che si manifestano in modo **continuo** (come l'altitudine, la temperatura, la pendenza del suolo, ecc.),

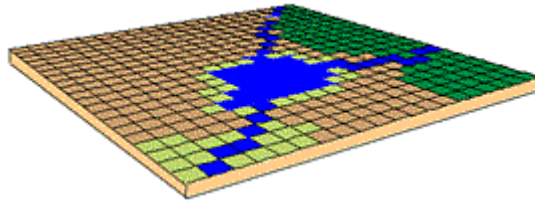
- esistono ovunque (ad es. ogni punto del suolo ha una altitudine o una pendenza),
- non hanno limiti individuabili.

In un GIS il "Mondo reale" viene rappresentato secondo tre elementi:

- 1) la **posizione geografica** (*location*) definita dalle coordinate espresse in un dato sistema di riferimento (ad es. latitudine e longitudine); si parla di "dati spaziali" (***spatial data***);
- 2) gli **attributi**, i quali forniscono un'informazione descrittiva del dato spaziale. Queste informazioni sono espresse mediante dati alfanumerici (ad esempio il codice postale oppure il numero civico), testi, disegni, foto, ecc. E' così possibile collocare geograficamente dati che non hanno intrinsecamente una connotazione geografica diretta \Rightarrow dati "aspaziali" (***aspatial data***);
- 3) le **relazioni spaziali**, quali la *connessione*, l'*adiacenza*, l'*inclusione*, che individuando le mutue relazioni tra gli elementi del territorio, permettono di strutturare i dati stessi definendone la ***topologia***;

I modelli dei dati correntemente impiegati sono due:

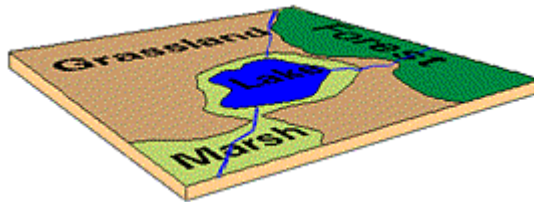
Modello
RASTER



Unità di base: **cella**

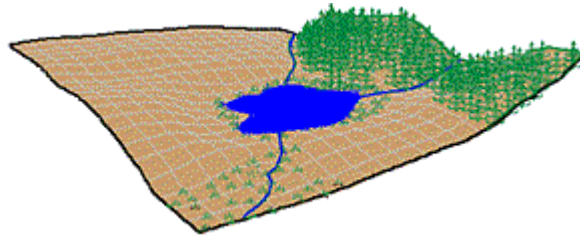
- quadrata → modello **GRID**
- triangolare → modello **TIN**

Modello
VETTORIALE



Unità di base: primitive geometriche
punto, linea e poligono.

Area di studio



Tramite questi modelli, lo stesso contesto geografico può essere analizzato sotto punti di vista differenti acquisendo quindi **differenti livelli informativi.**

La scelta del modello è influenzata :

- dalla fonte dei dati e dalla modalità di acquisizione;
- dagli strumenti di elaborazione disponibili;
- dai risultati che si vogliono ottenere (obiettivo dell'analisi spaziale).

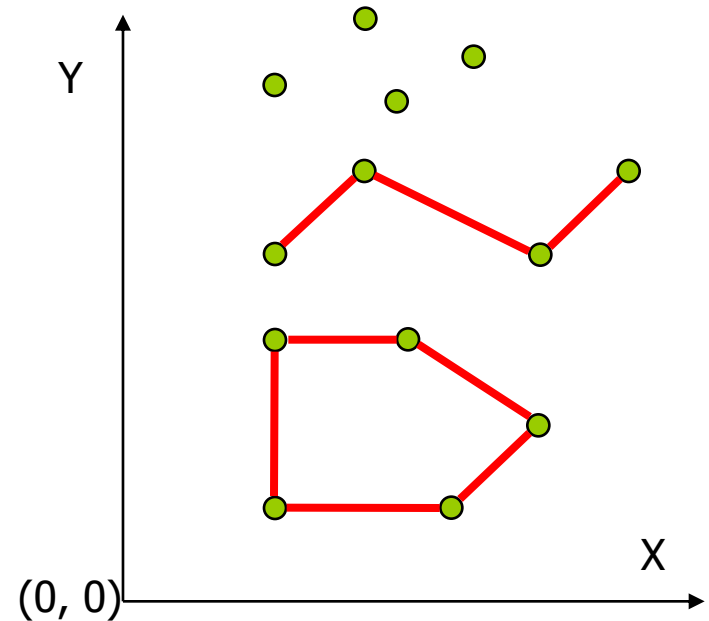
Il modello Vettoriale

Qualsiasi oggetto geografico di interesse del mondo reale viene rappresentato mediante **punti**, **linee** e **poligoni**.

La corrispondenza tra un oggetto disposto sulla superficie del terreno e la sua rappresentazione geometrica registrata nel database del SIT (**georeferenziazione**) si realizza attraverso sistemi di coordinate X, Y (ed, eventualmente, Z).

Tali coordinate sono espresse rispetto ad un sistema di riferimento.

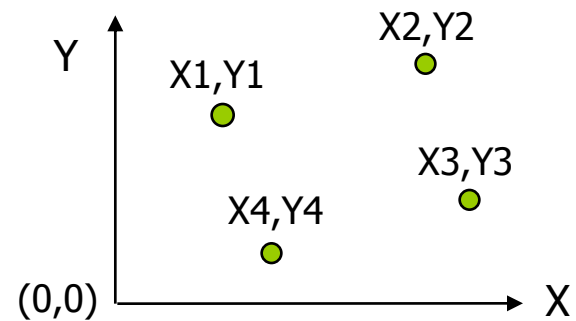
- coordinata X (Est)
- coordinata Y (Nord)



I punti

Non hanno dimensione, ma solo posizione.

Sono rappresentati da coppie (o triplette) di coordinate.



La geometria punto è utilizzata per definire posizioni discrete di oggetti geografici troppo piccoli per essere rappresentati con linee o aree.

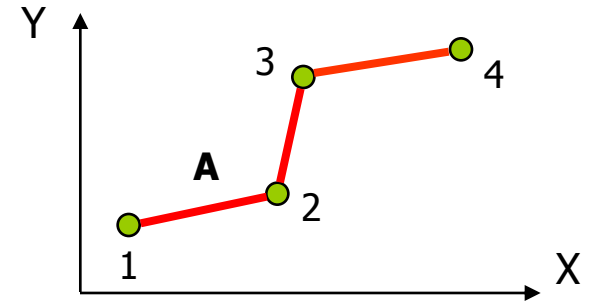
Punti possono quindi rappresentare ad esempio: alberi, pali telefonici o elettrici, pozzi di irrigazione, tombini, cime di montagne, posizioni misurate con il GPS, ecc.



La linea

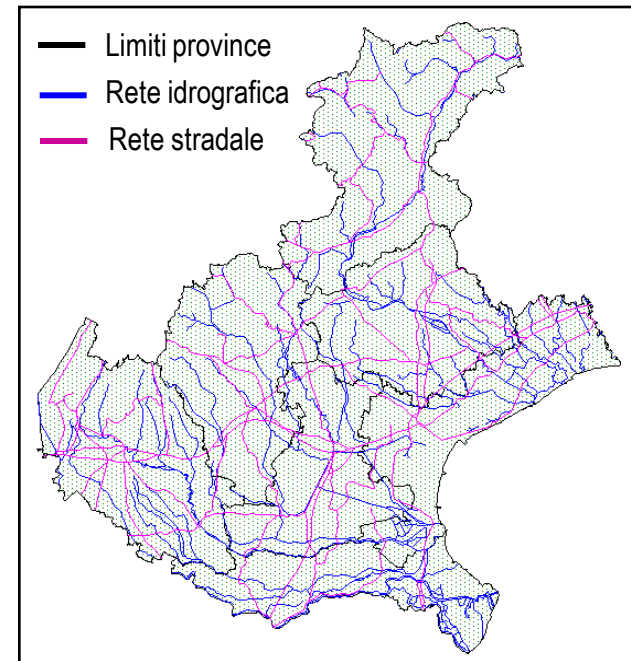
Insieme di punti connessi da segmenti.

E' descritta dalla sequenza delle coordinate dei punti che la compongono.



Linea A = $X_1, Y_1; X_2, Y_2; X_3, Y_3, X_4, Y_4$

Una linea può modellizzare una strada (bordi e asse centrale), corsi d'acqua, limiti amministrativi, linee elettriche, curve di livello, ecc.



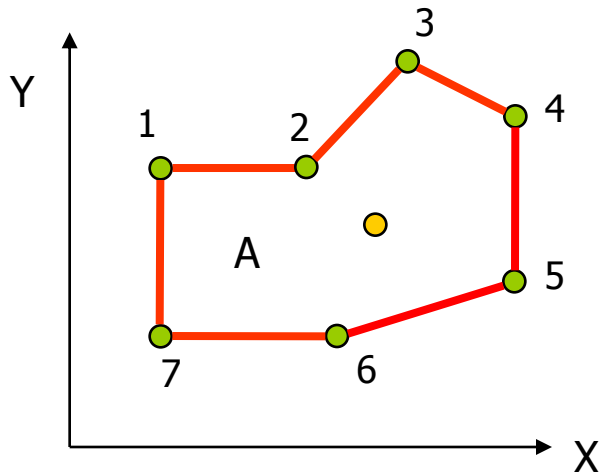
Poligono (o area)

E' definito da una linea chiusa, costituita a sua volta da punti connessi da segmenti.

In un poligono il puunto iniziale e finale della linea chiusa coincidono.

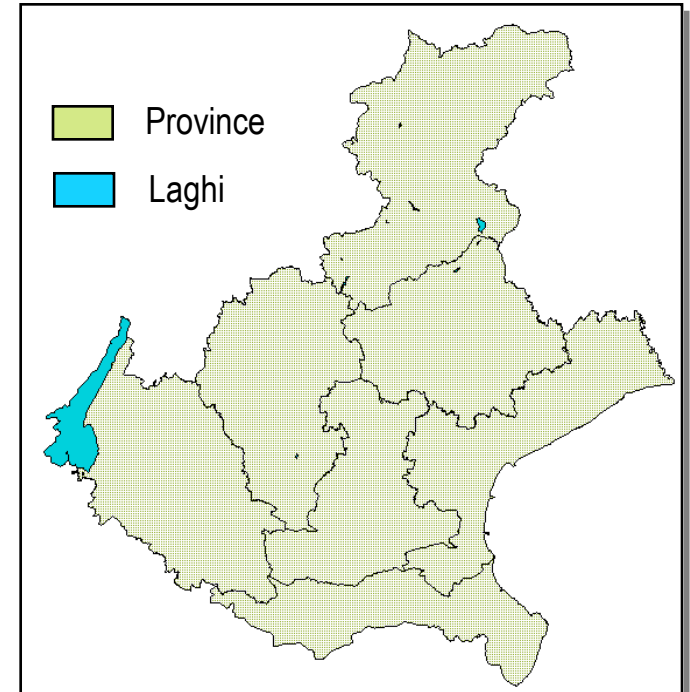
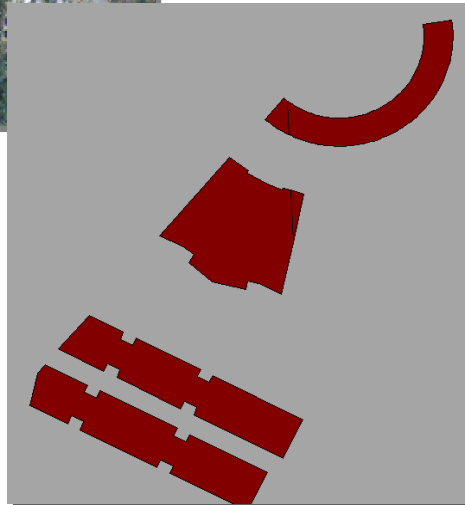
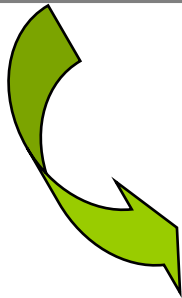
Il punto che può essere considerato geometricamente il centro del poligono si definisce **centroide**.

Vengono descritti tramite una una serie di coordinate relative ai segmenti di linea che racchiudono un poligono.



poligono A = $X_1, Y_1; X_2, Y_2; X_3, Y_3; X_4, Y_4;$
 $X_5, Y_5; X_6, Y_6; X_7, Y_7; X_1, Y_1$

I poligoni sono impiegati per rappresentare la forma e la posizione di oggetti geografici omogenei come ad esempio: stati, regioni, comuni, particelle catastali, uso del suolo, laghi, geologia, edifici, ecc.



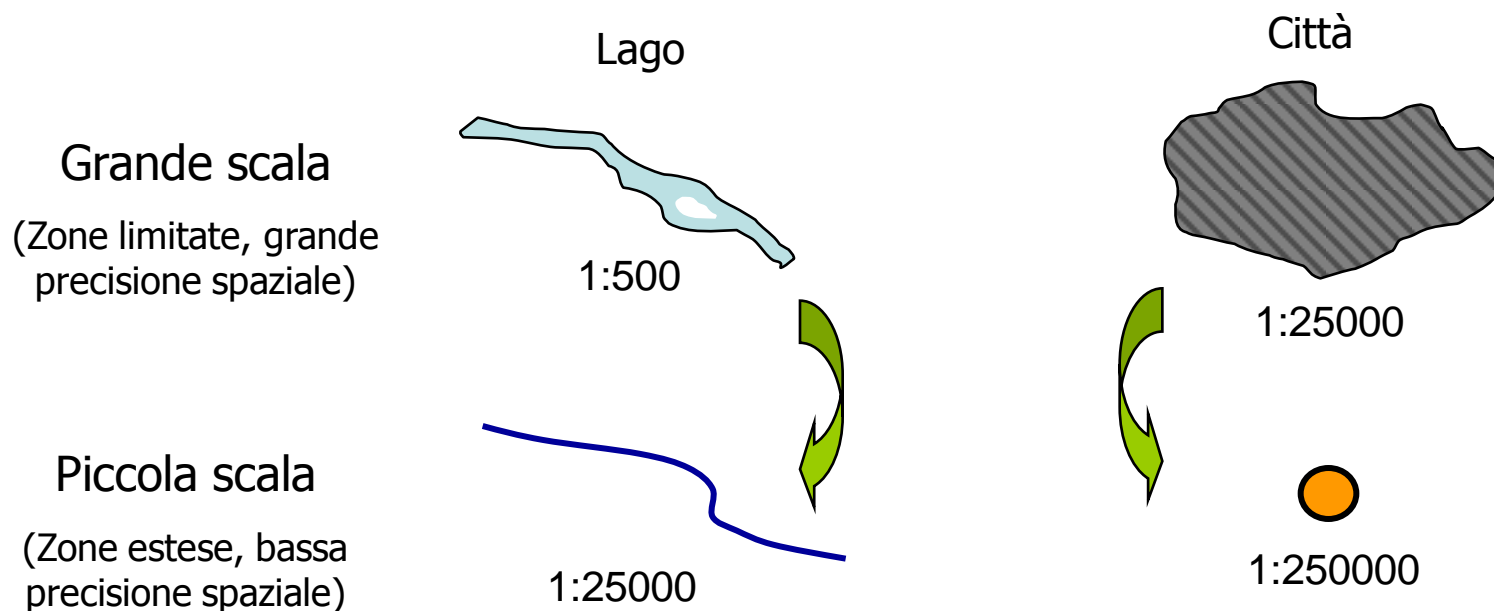
Esempio di modelli vettoriali sovrapposti



Una stessa entità geografica può essere rappresentata in un modello vettoriale con diverse primitive geometriche a seconda degli scopi della rappresentazione o della scala di osservazione.

La **scala** della mappa determina quindi la **dimensione** e la **forma** degli elementi rappresentati.

Ad esempio, al crescere della scala un punto può simboleggiare una città, un edificio, un segnale stradale.



La Topologia

Il termine deriva dal greco Topos + logos, ovvero "studio dei luoghi", ed è un settore della geometria che studia le proprietà delle forme e le loro relazioni geometriche.

Nell'ambito dei GIS, attraverso la topologia è possibile definire relazioni di **connessione**, **adiacenza** e **inclusione** tra primitive geometriche (punti, linee e poligoni) e quindi analizzare le **relazioni spaziali** fra dati geografici.

Un GIS si dice **topologicamente strutturato** se nel suo modello dei dati oltre alla descrizione geometrica (coordinate) degli oggetti geografici vengono esplicitamente registrate (codificate) anche le relazioni topologiche fra gli oggetti stessi.

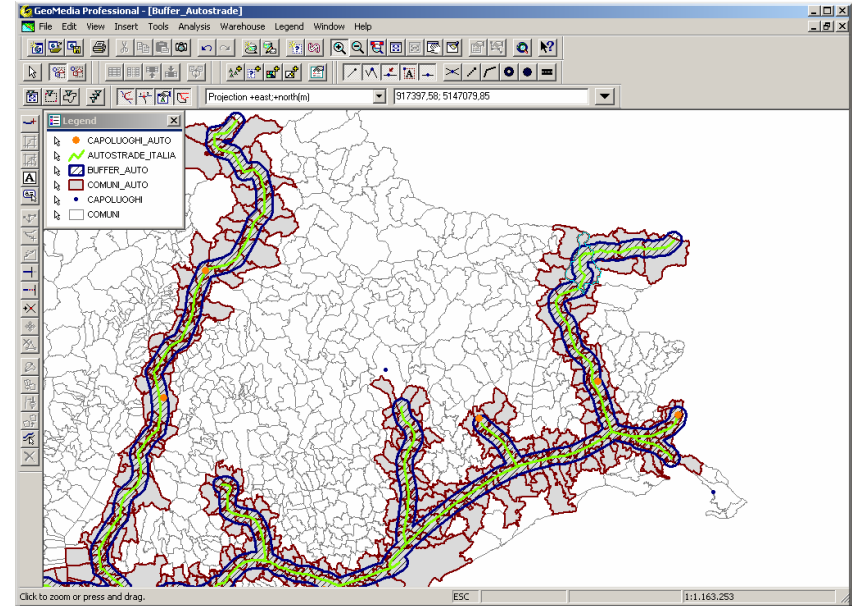
Le relazioni spaziali citate si possono calcolare direttamente anche sfruttando relazioni geometriche, in modo però più oneroso e meno efficiente dal punto di vista computazionale.

A cosa serve la topologia ?



Prossimità

Quali allevamenti distano 3 Km e 10 Km dal focolaio dell'epidemia ?



Intersezione

Quali sono i comuni attraversati da autostrade ? (fascia di rispetto)



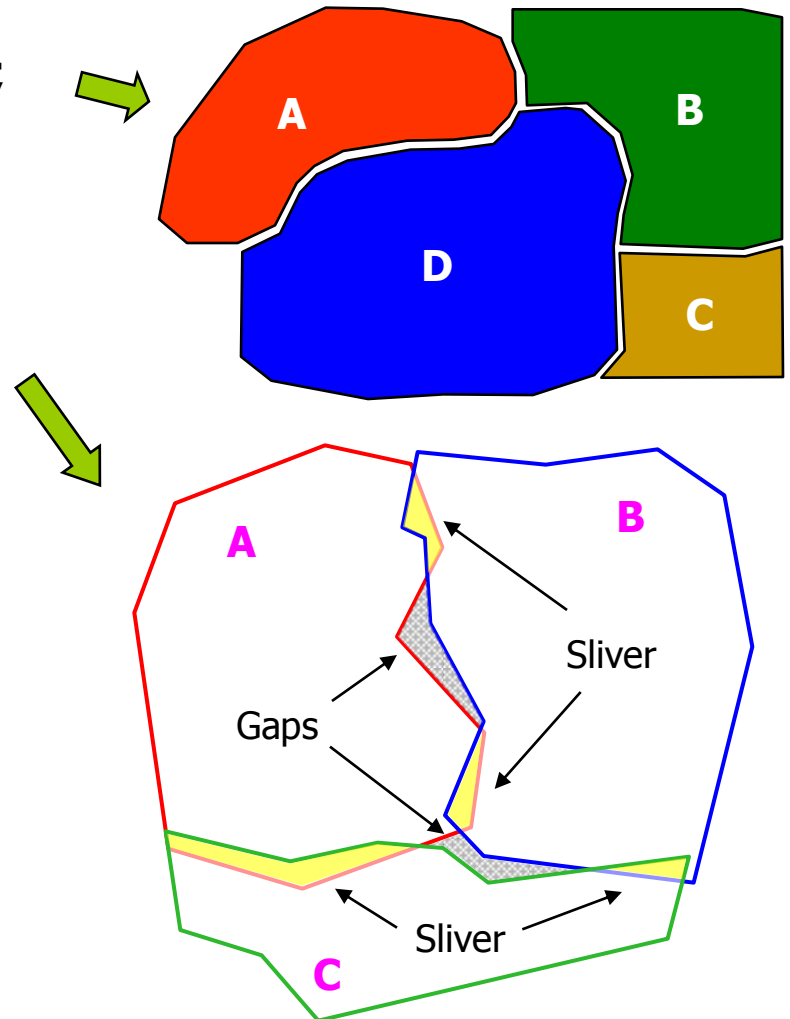
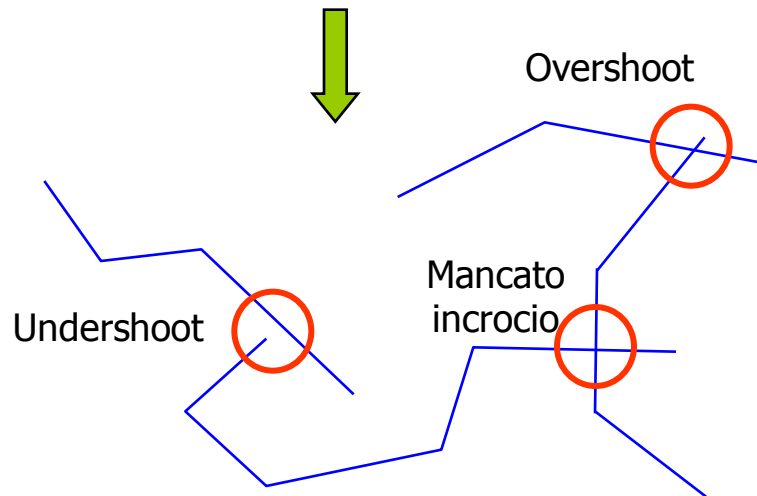
Network (rete)

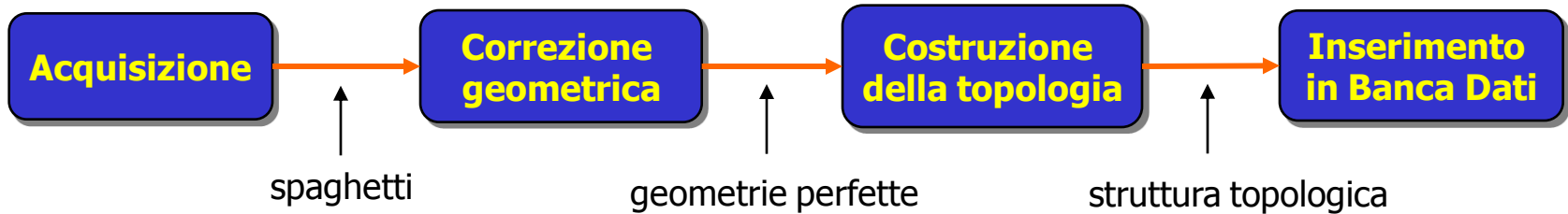
Qual è il percorso migliore per raggiungere la stazione dall'hotel?

La Topologia garantisce anche la **coerenza geometrica**.

Nella fase di generazione della Topologia è possibile individuare e quindi correggere una serie di errori solitamente prodotti durante la procedura di digitalizzazione da fonti cartografiche:

- linee doppie che separano due poligoni;
- mancata chiusura di poligoni;
- generazione di micropoligoni (*sliver polygons*) da sovrapposizioni (*overlays*);
- generazione di “buchi” (*gaps*);
- linee che non si connettono, ecc.





Spaghetti: modello vettoriale in cui le primitive geometriche sono memorizzate come sequenze di coordinate, non c'è topologia.

La correzione geometrica può avvenire in due modi:

- controllando manualmente il processo di acquisizione tramite funzioni interattive di editing grafico (es. snap, completamento automatico, ecc.)
- tramite software appositi che controllano e correggono "a posteriori" un insieme di dati geometricamente non corretti.

Una volta ottenuti dati geometricamente perfetti ("topologicamente consistenti") è possibile costruire delle strutture tabellari che esplicitano le relazioni tra gli elementi geometrici.

Nel modello topologico valgono le seguenti corrispondenze:

- punto → **nodo**
- linea → **arco**
- poligono → **area**

Schema delle relazioni topologiche maggiormente utilizzate

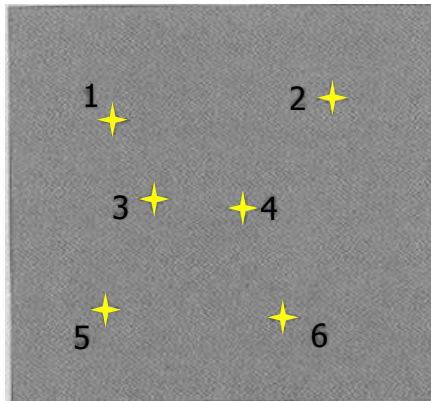


Non esiste un modo univoco per definire fisicamente un certo tipo di topologia:

- le relazioni definibili tra archi, nodi e aree dipendono dal fenomeno del mondo reale che viene modellato (es. per una rete stradale non vi saranno relazioni che riguardano le aree);
- ogni produttore di software GIS utilizza una o più di queste topologie, in formati specifici che in genere sono proprietari (es. coverage di ESRI).

La Topologia arco-nodo

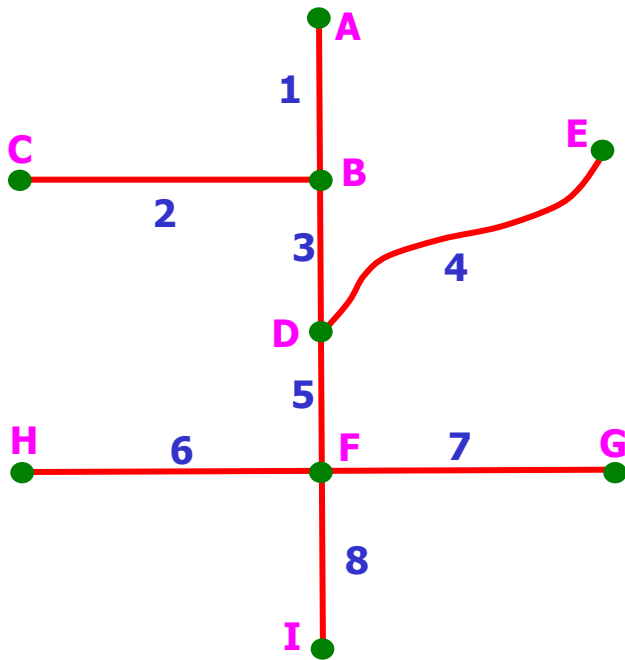
Alla primitiva **nodo** (definito dalle sue coordinate geografiche) viene associato un codice identificativo tramite il quale tutte le relative informazioni descrittive vengono legate al nodo stesso.



punto	X	Y
1	X1	Y1
2	X2	Y2
3	X3	Y3
4	X4	Y4
5	X5	Y5
6	X6	Y6

La topologia **arco** contiene:

- codice identificativo unico dell'oggetto per l'associazione degli attributi;
- i **nodi** (punti all'inizio e alla fine dell'arco);
- i **vertici** (punti intermedi dell'arco);
- le coordinate cartografiche di vertici e nodi;
- verso di percorrenza (*dal* nodo *a* nodo);
- informazione di connettività con altri archi.



Per definire gli archi e le relazioni topologiche si usano tre tabelle

arco	da nodo	a nodo
1	A	B
2	C	B
3	B	D
4	E	D
5	D	F
6	H	F
7	G	F
8	F	I

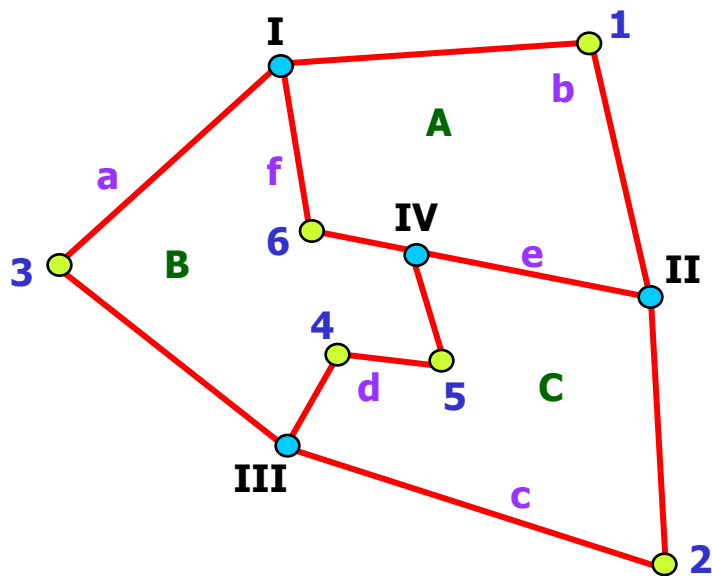
arco	coordinate punti
1	X1,Y1;X2,Y2
2	X1,Y1;X2,Y2
3	X1,Y1;X2,Y2
4	X1,Y1;...;Xn,Yn
5	X1,Y1;X2,Y2
6	X1,Y1;X2,Y2
7	X1,Y1;X2,Y2
8	X1,Y1;X2,Y2

nodo	connesso a
A	B
B	A,C,D
C	B
D	B,E,F
E	D
F	D,G,H,I
G	F
H	F
I	F

La topologia **area** si basa sulle regole del modello "*Full planar graph*":

1. ogni arco ha due nodi
2. ogni arco divide due aree
3. ogni area è circondata da archi e nodi
4. ogni nodo è circondato da aree e archi
5. tutte le intersezioni sono nodi

Con queste regole gli archi comuni a due poligoni non sono duplicati: si ottiene una struttura dati più snella e più efficiente.



poly	archi
A	b,e,f
B	a,f,d
C	c,d,e

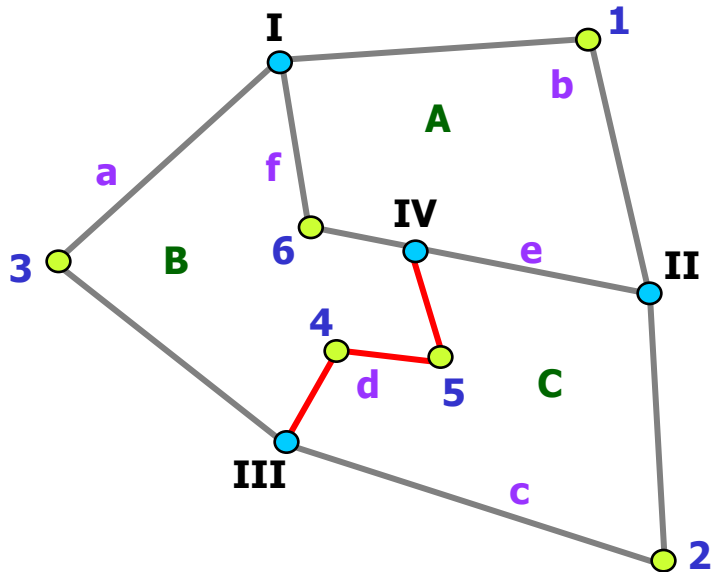
Anche le aree vengono definite tramite tre tabelle

arco	da nodo	a nodo	poly destro	poly sinistro
a	I	III	B	
b	I	II	A	
c	II	III	C	
d	III	IV	C	B
e	IV	II	C	A
f	IV	I	A	B

arco	nodo o vertice	coordinate
a	I	x,y
	3	x,y
	III	x,y
b	I	x,y
	1	x,y
c	II	x,y
	2	x,y
	III	x,y
d	III	x,y
	4	x,y
	5	x,y
	IV	x,y
....
....

La topologia arco-nodo consente di implementare in un GIS le relazioni spaziali di **connessione**, **adiacenza**, **unione** e **intersezione**.

Connessione



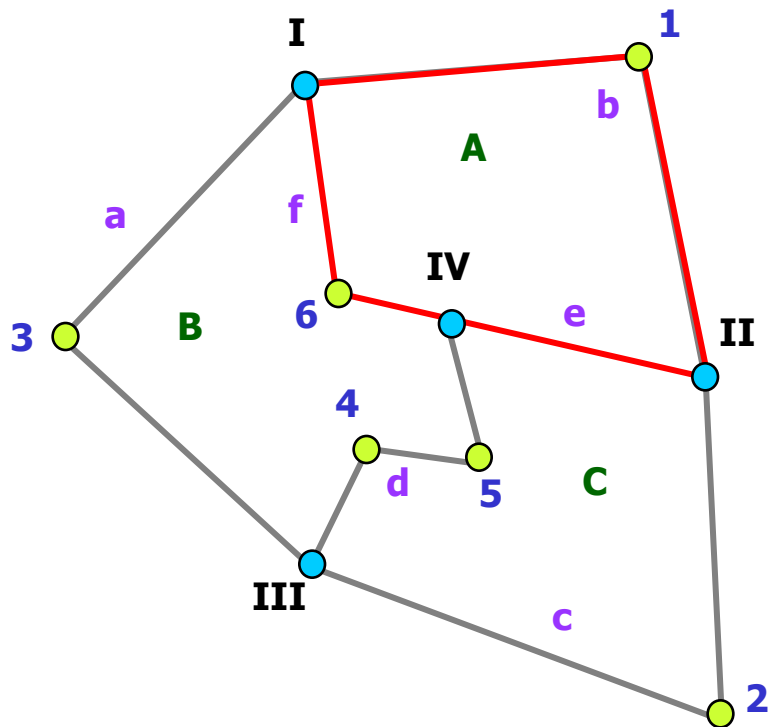
(a)

arco	da nodo	a nodo	poly destr	poly sinisr
a	I	III	B	
b	I	II	A	
c	II	III	C	
d	III	IV	C	B
e	IV	II	C	A
f	IV	I	A	B

Con quali archi è connesso l'arco "d" ?

Soluzione: basta controllare nella tabella (a) quali sono gli archi che hanno un nodo in comune con l'arco "d".

Adiacenza



(a)

poly	archi
A	b,e,f
B	a,f,d
C	c,d,e

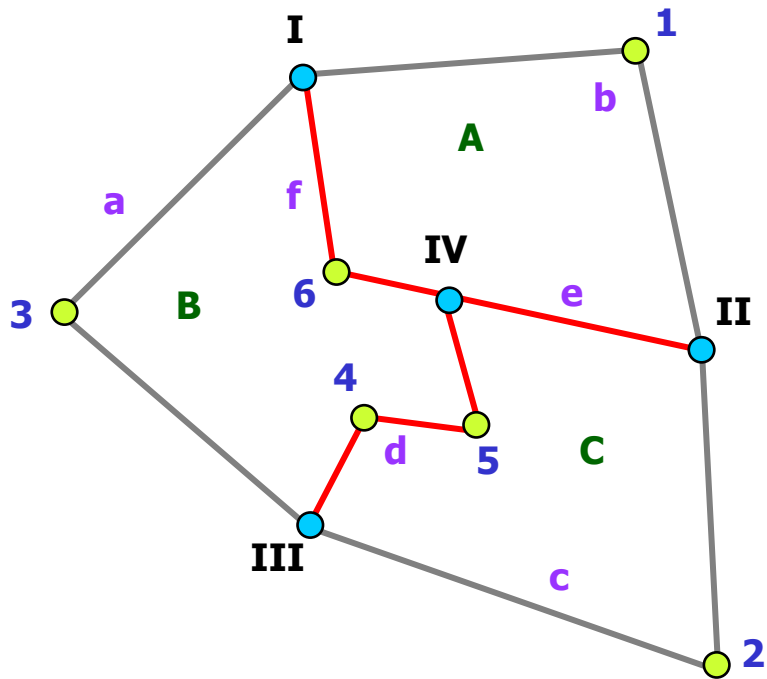
(b)

arco	da nodo	a nodo	poly destr	poly sinistr
a	I	III	B	
b	I	II	A	
c	II	III	C	
d	III	IV	C	B
e	IV	II	C	A
f	IV	I	A	B

Quali sono i poligoni adiacenti al poligono "A" ?

Soluzione: nella tabella (b) si controlla quale arco componente di A presenta alla sua destra o sinistra un altro poligono.

Unione



arco	da nodo	a nodo	poly destro	poly sinistr
a	I	III	B	
b	I	II	A	
c	II	III	C	
d	III	IV	C	B
e	IV	II	C	A
f	IV	I	A	B

Archi da eliminare

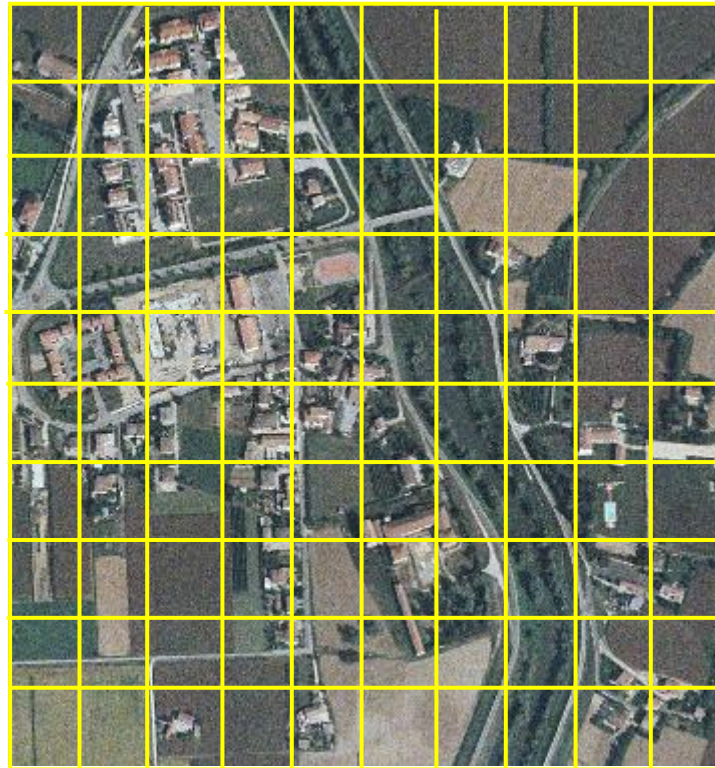
Eliminare gli archi che separano poligoni con lo stesso valore di un attributo.

Soluzione: basta individuare nella tabella della topologia gli archi che hanno a destra e a sinistra gli stessi poligoni.

Il modello Raster - Grid

L'area geografica analizzata viene rappresentata mediante una **griglia regolare** suddivisa in tante piccole celle di ugual dimensione.

La cella costituisce l'unità di informazione (**grid cell** o **pixel**).

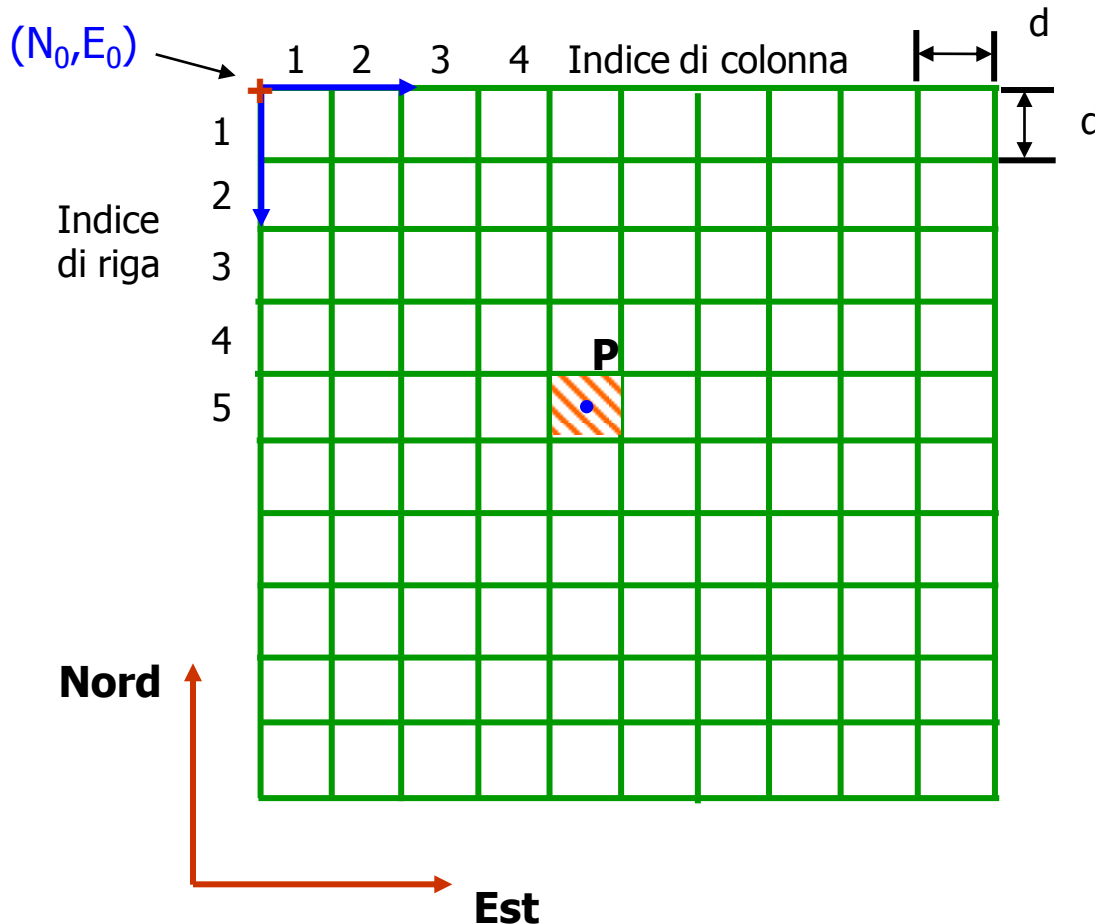


Proprietà del GRID

1. Diversamente dal modello vettoriale, nel raster GRID la cella non rappresenta un oggetto, bensì uno spazio (area) dove una grandezza assume un certo valore.
2. Ogni cella può assumere **uno ed un solo** valore.
3. Il valore della cella codifica in forma **numerica** un attributo associato alla porzione di area rappresentata dalla cella stessa.
4. Ad ogni cella è possibile associare un solo tipo di attributo.
5. A zone del territorio aventi le stesse caratteristiche di quel dato attributo corrispondono celle di ugual valore.

Georeferenziazione di un GRID

La posizione geografica di ciascuna cella viene memorizzata sfruttando una rappresentazione matriciale del GRID.



d = Dimensione della cella sul terreno

r = indice di riga

c = indice di colonna

Coordinate di P:

$$E_p = E_0 + c(P) \cdot d - d/2$$

$$N_p = N_0 - r(P) \cdot d - d/2$$

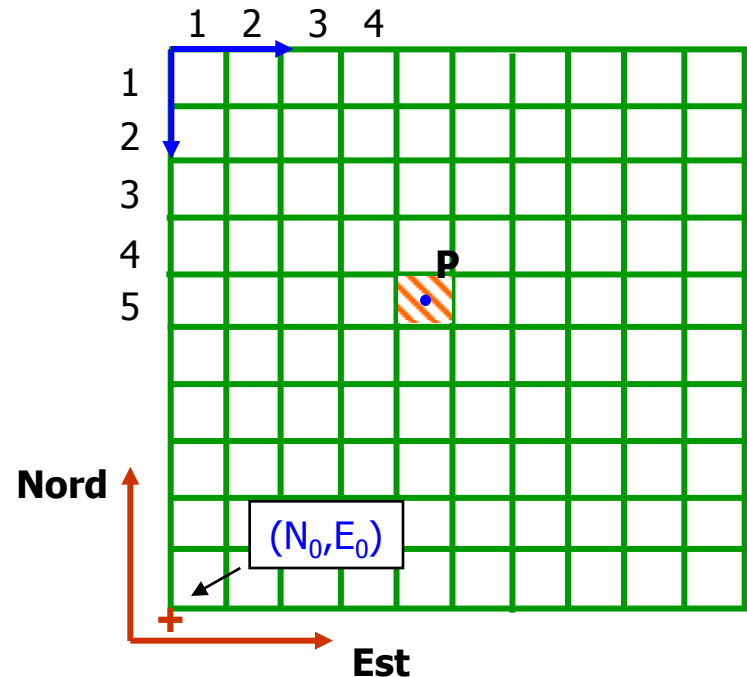
La rappresentazione matriciale di un GRID consente di ricavare la posizione geografica di una cella conoscendo solamente un numero limitato di parametri:

- le coordinate cartografiche della cella di origine (N_0, E_0);
- la dimensione a terra della cella lungo l'asse Est e Nord (d);
- gli indici di riga e colonna della posizione della cella nella matrice.

Solitamente però la cella origine è posta in basso a sinistra nella matrice, anziché in alto a destra.

Come cambia in questo caso la formula di georeferenziazione ?

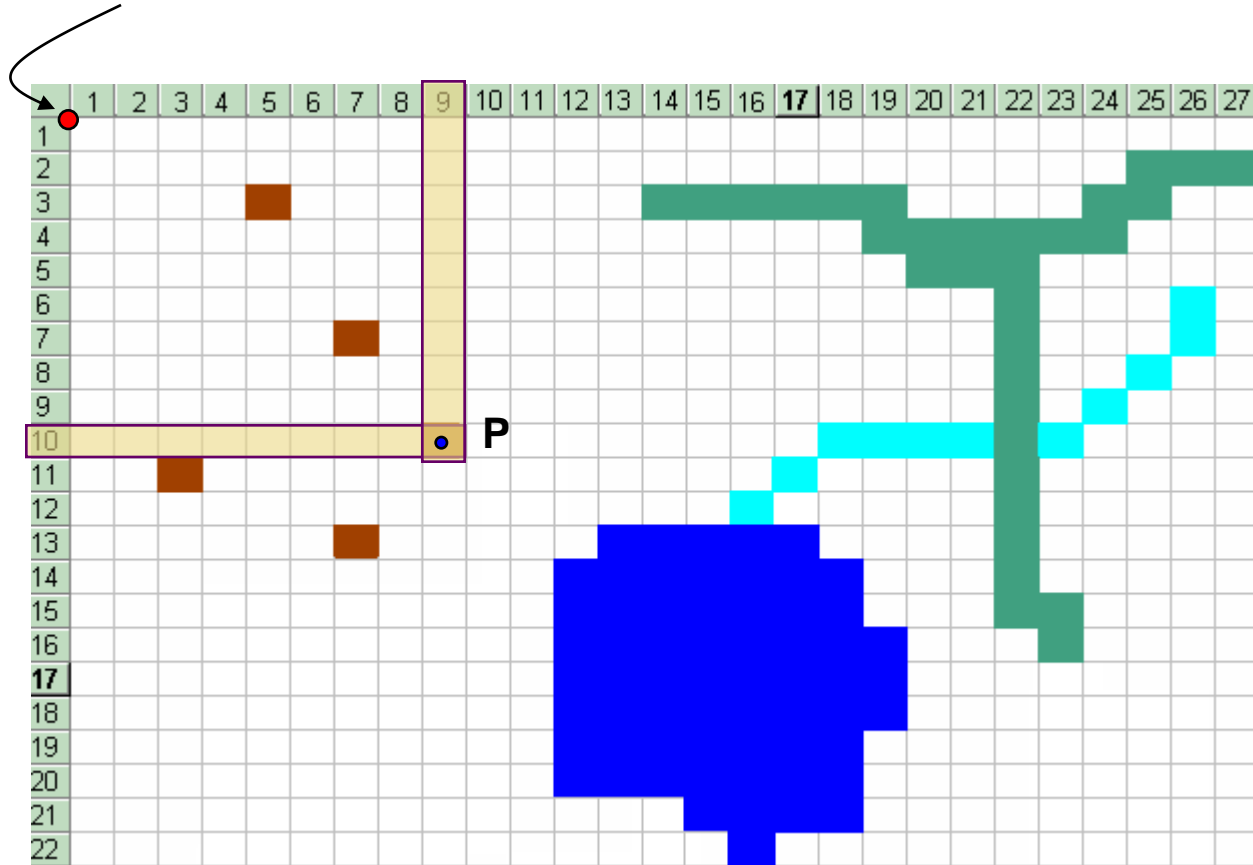
(Suggerimento: considerare anche il numero N_r di righe della matrice)



Esempio di georeferenziazione

$$E_0 = 1654000 \text{ m} \quad N_0 = 5090999 \text{ m}$$

$$d = 0.60 \text{ m}$$



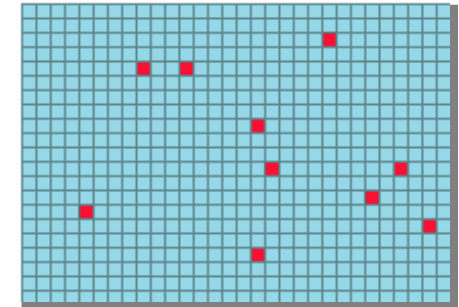
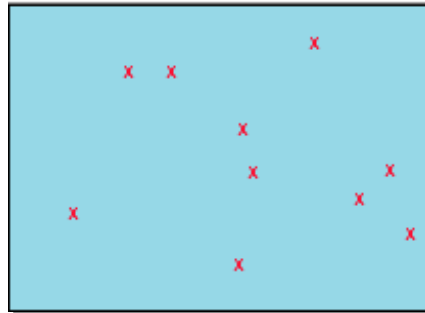
$$P = (X_P, Y_P) \begin{cases} E_P = 1654000 + 9 \cdot 0.60 - 0.30 = 1654005,1 \text{ m} \\ N_P = 5090999 - 10 \cdot 0.60 - 0.30 = 5090992,7 \text{ m} \end{cases}$$

Rappresentazione delle entità

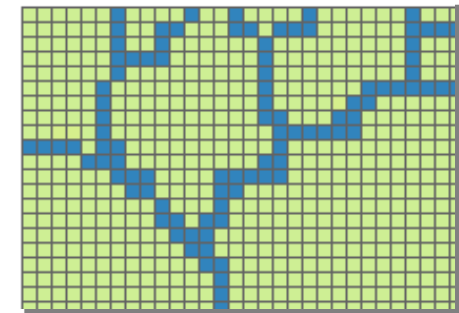
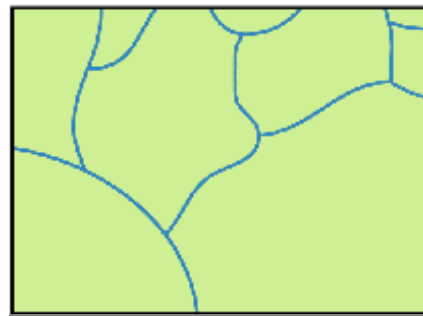
vettoriale

raster

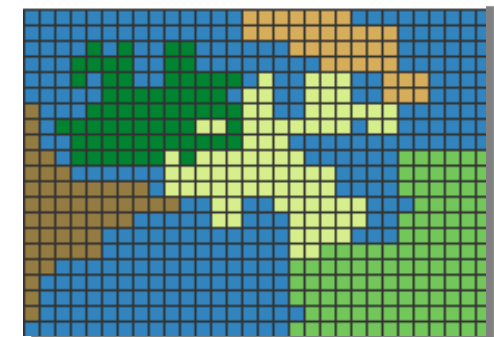
Punti come singole celle



Linee come sequenze di celle



Poligoni come insieme di celle



Conversione da Vector a Raster

La trasformazione di dati dal modello Vettoriale (o Vector) al modello Raster viene eseguita principalmente quando si verifica una delle due condizioni:

- a) il dato nel suo formato vettoriale non si presta ad essere elaborato efficacemente.

Dati poligonali possono essere correlati tra loro in modo molto più efficiente trasformandoli in raster GRID e applicando le tecniche di analisi proprie della "Map Algebra".

- b) il dato rappresenta una grandezza che varia con continuità nello spazio (es. morfologia del terreno, temperatura, densità di popolazione, ecc.).

In questo caso il formato vettoriale mal si presta a comunicare l'informazione di continuità che invece è meglio resa da una rappresentazione di tipo raster.

- Nel primo caso la trasformazione da un modello all'altro comporta un effetto di **discretizzazione** delle entità del mondo reale poiché si utilizzano celle di dimensione finita come unità di base.

Si genera una perdita di accuratezza nella rappresentazione degli elementi geografici rispetto al modello vettoriale: le primitive geometriche (punto, linea, poligono) vengono infatti "espansse" su una o più celle.

- Nel secondo caso invece, la grandezza o il fenomeno continuo da modellare sono noti solamente sottoforma di una serie di campioni di misura distribuiti nello spazio in modo più o meno irregolare.

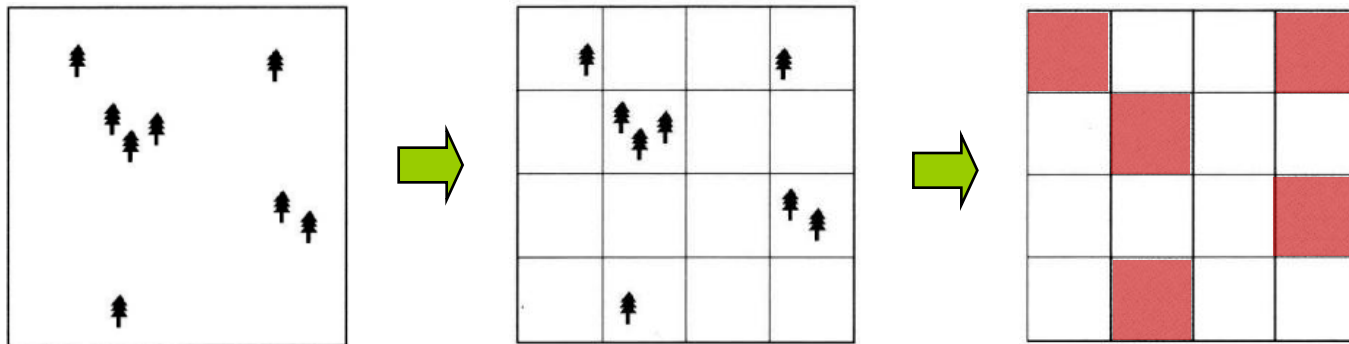
Ad esempio la morfologia del terreno non è nota con continuità bensì in modo discreto sottoforma di punti quotati o curve di livello.

La ricostruzione della natura "continua" della grandezza in oggetto si basa sull'applicazione di algoritmi di **interpolazione** ai campioni di misura.

Rasterizzazione di un modello vettoriale

Vediamo quali problematiche insorgono quando le primitive geometriche vettoriali (punto, linea e poligono) vengono discretizzate su una serie di celle di dimensione finita.

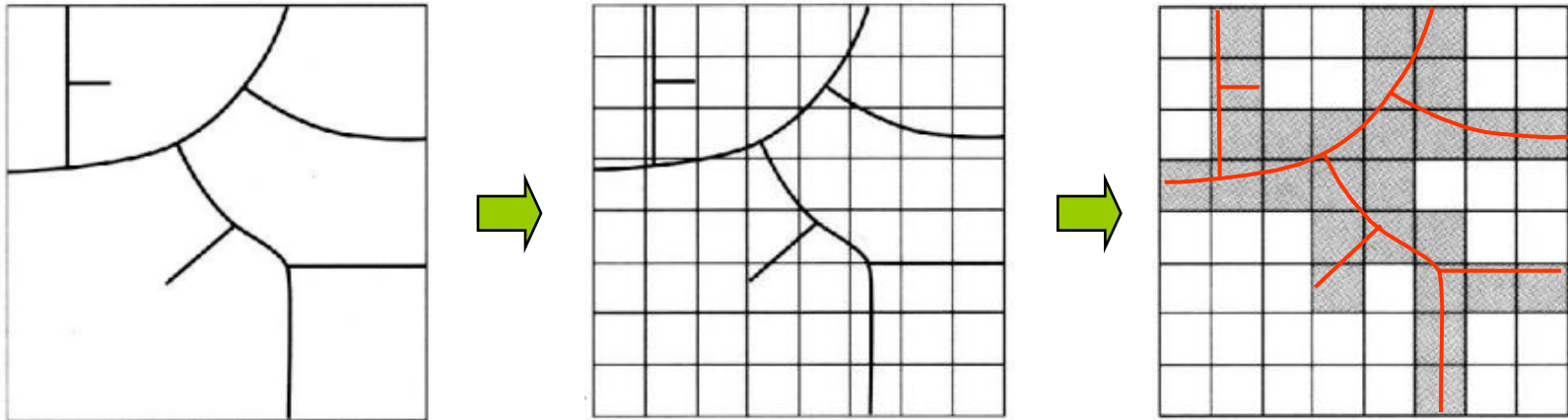
- Discretizzazione di punti



Più alberi (oggetti puntuali) vengono mappati nella stessa cella:

- perdita di informazione sulla posizione precisa di ogni singolo albero;
- perdita di identità di ogni singolo elemento.

- Discretizzazione di linee

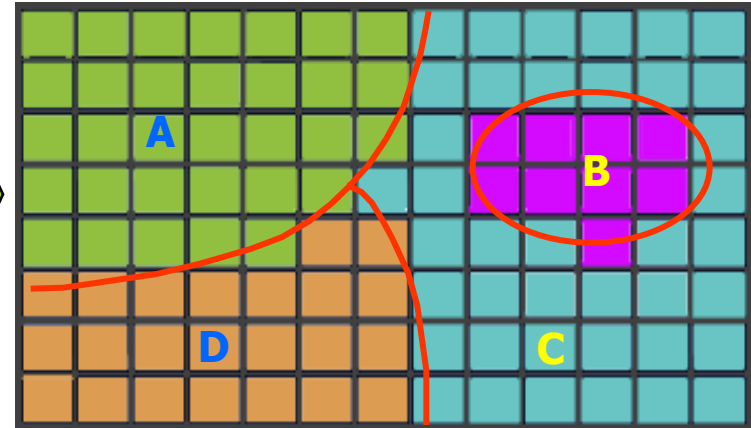
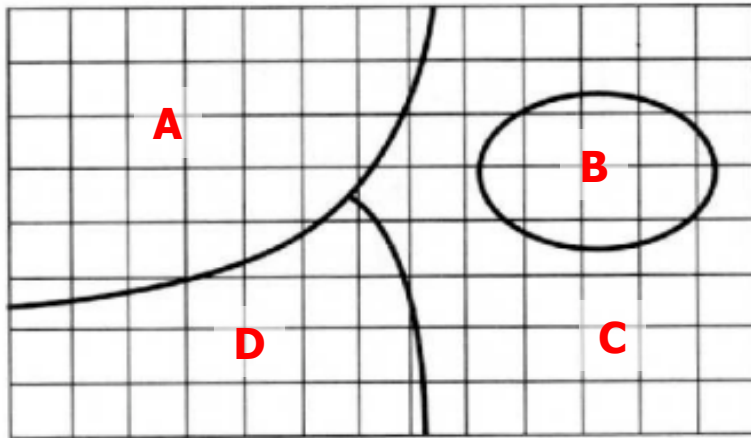


Per riportare le linee (es. strade) in forma raster è necessario indicarne la presenza in tutte le celle interessate.

La presenza della linea è associata in egual misura a tutte le celle attraversate, indipendentemente dall'entità dell'intersezione.

Problema di connessione spaziale delle celle: misure di distanza tra due vertici di una linea forniscono valori diversi a seconda se le corrispondenti celle sono disposte in direzione ortogonale o in diagonale.

■ Discretizzazione di poligoni



Rasterizzazione con criterio di prevalenza

Nel caso di un poligono (area) bisogna definire il criterio in base al quale indicare la sua presenza o meno nelle celle della matrice:

- presenza parziale → si può indicare il poligono come presente per intero o come assente, in ogni caso si genera un errore di quantificazione;
- presenza con occupazione minima della cella → l'area risulterà falsata in eccesso;
- “soglia” per occupazione → possibilità di eliminare piccole aree.

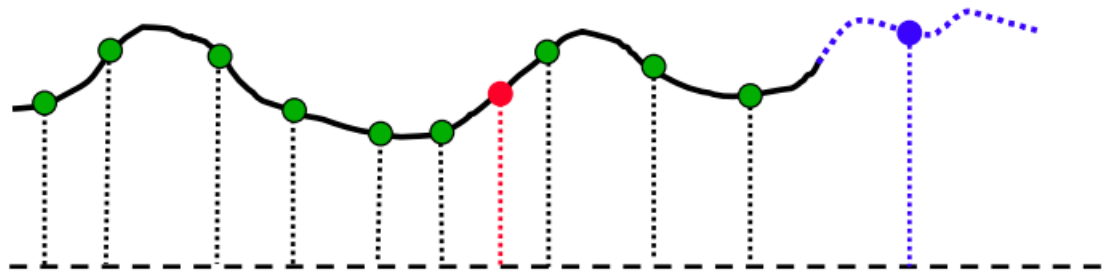
Interpolazione ed estrapolazione

Interpolazione

Procedura di stima dei valori, non noti, assunti da una grandezza (es. elevazione del terreno) in punti intermedi a punti in cui tale grandezza è stata misurata.

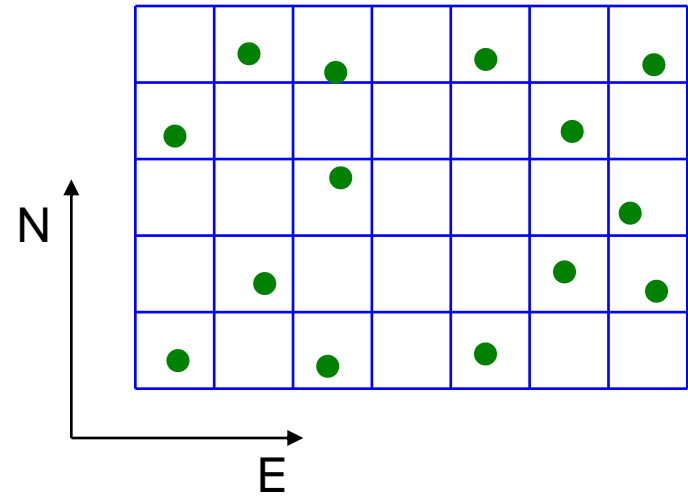
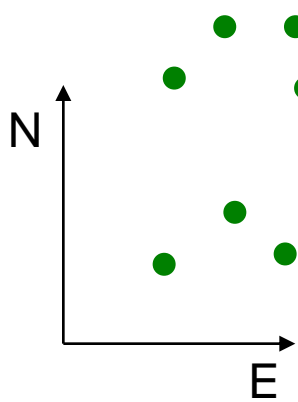
Estrapolazione

Tecnica di predizione dei valori, non noti, assunti da una grandezza all'esterno dell'area campionata, sulla base dei valori della grandezza misurati in alcuni punti di riferimento.



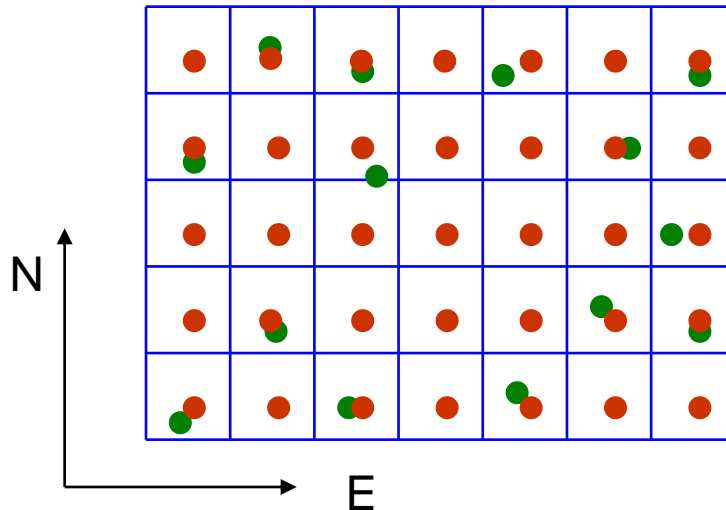
- Campioni di misura
- Interpolazione
- Estrapolazione

Creazione di un raster per interpolazione



1) I dati (ad es. quote terreno) sono acquisiti in modo **irregolare**.

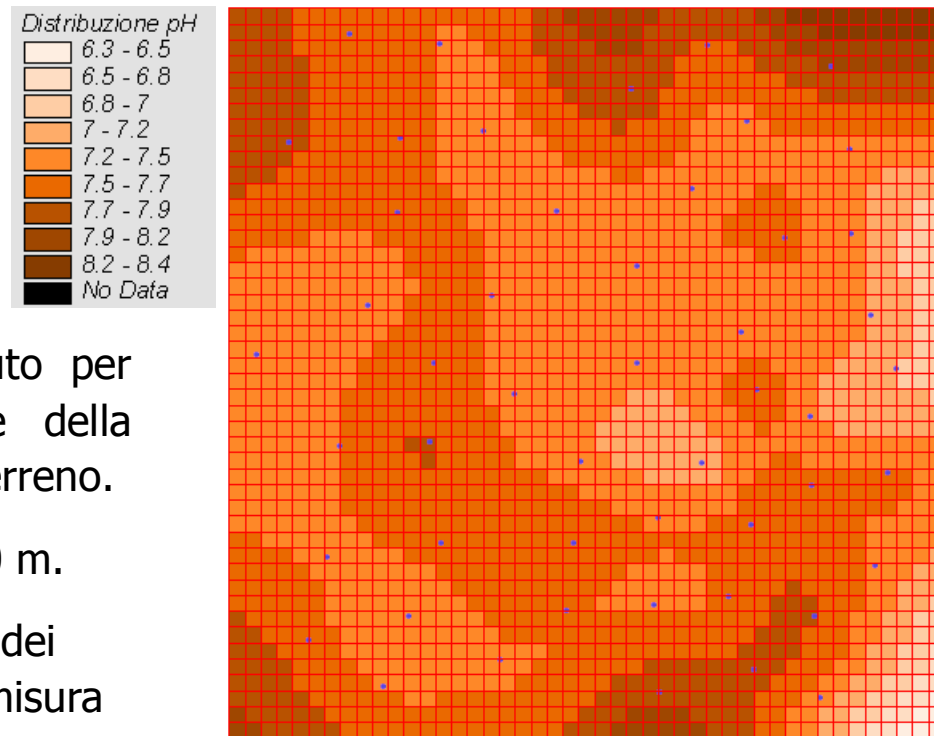
2) I valori delle celle del Grid sono determinati secondo una griglia **regolare**.



3) I valori delle celle sono calcolati tramite algoritmi di **interpolazione**.

Gli algoritmi di interpolazione basano il loro funzionamento sul concetto di **correlazione spaziale**, assumono cioè l'ipotesi che misure spazialmente vicine della stessa grandezza siano legate tra loro da una qualche relazione matematica.

Questo è tanto più vero quanto maggiore è la densità delle misure.



Esempio di GRID ottenuto per interpolazione di misure della distribuzione del pH nel terreno.

Dimensione delle celle: 20 m.

Punti in blu: distribuzione dei campioni di misura

Risoluzione e dimensione minima

Nell'ambito dei GRID, il termine **risoluzione** indica la dimensione della cella: più piccola è la sua dimensione, maggiore è la risoluzione del raster.

La scelta della dimensione della cella dipende dai seguenti fattori:

- risoluzione spaziale dei dati di input (funzione a sua volta del metodo e degli strumenti di acquisizione);
- ampiezza dell'area di studio;
- capacità di memorizzazione e velocità di elaborazione del calcolatore;
- precisione e livello di dettaglio richiesti per l'analisi.

- Una cella di piccole dimensioni consente di rappresentare gli elementi geografici (oggetti e fenomeni) con grande dettaglio e accuratezza.

A parità di estensione di territorio da “coprire”, una risoluzione elevata comporta però l’uso di un raster con un numero molto elevato di celle e di conseguenza:

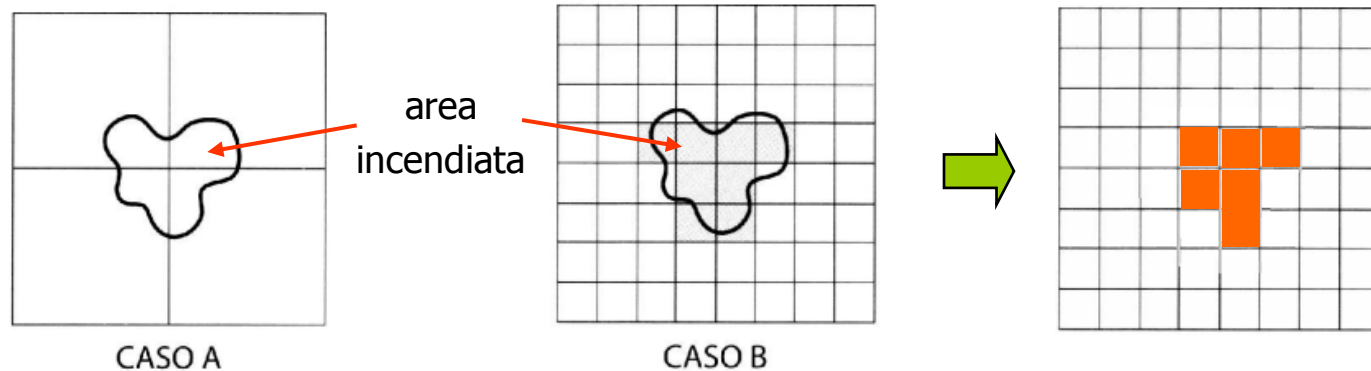
- un maggiore spazio di memorizzazione;
- un maggiore tempo di elaborazione.

Questo incremento nella richiesta di hardware va attentamente considerato quando si desidera rappresentare una porzione di territorio molto ampia con un raster ad alta risoluzione.

- Se invece la cella è troppo grande si può perdere dell’informazione oppure nascondere delle entità o caratteristiche di interesse.

Vediamo un esempio.

Supponiamo di voler rappresentare in un raster GRID l'area incendiata di un bosco eseguendo una discretizzazione del poligono che la rappresenta e adottando una classificazione delle celle per "soglia".



Caso A: la dimensione della cella è tanto grande che l'area copre una superficie minima di ogni cella, pertanto essa non verrà rappresentata in nessuna cella.

Caso B: l'area incendiata copre gran parte di almeno sei celle, pertanto verrà rappresentata dalle sei celle in arancione.

Tipologie di raster GRID

Esistono diversi tipi di raster GRID che riportano informazioni sul territorio ognuno con uno specifico contenuto informativo e con specifiche modalità di gestione all'interno di un software GIS.

- **Raster fisici**

Ogni cella indica una misura effettuata in una particella di territorio relativa ad una grandezza definita in genere in modo **continuo** sul territorio stesso.

La misura può riferirsi:

- al valore **medio** che la grandezza prende all'interno della cella;
- ad un valore estremo che la grandezza prende all'interno della cella (**massimo** o **minimo**);
- al valore che la grandezza prende nel **centro** del pixel.

A questa categoria appartengono le immagini rilevate da **aereo** o da **satellite**.

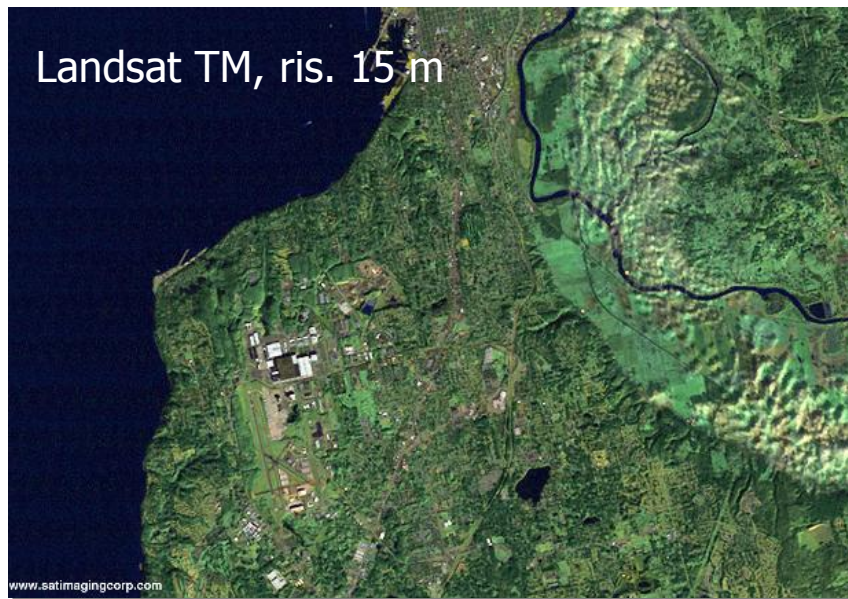
In questo caso ad ogni cella del raster viene associato un valore numerico che rappresenta una misura della quantità di energia elettromagnetica proveniente dalla porzione di terreno corrispondente alla cella rilevata dal sensore di misura.

L'unità spaziale elementare prende il nome di **pixel** (*picture element*) e la sua dimensione (risoluzione del raster), intesa come dimensione del lato dell'area coperta al suolo, si misura in metri.

Un'immagine fisica presenta valori che variano in genere in modo pressochè continuo da un pixel all'altro.

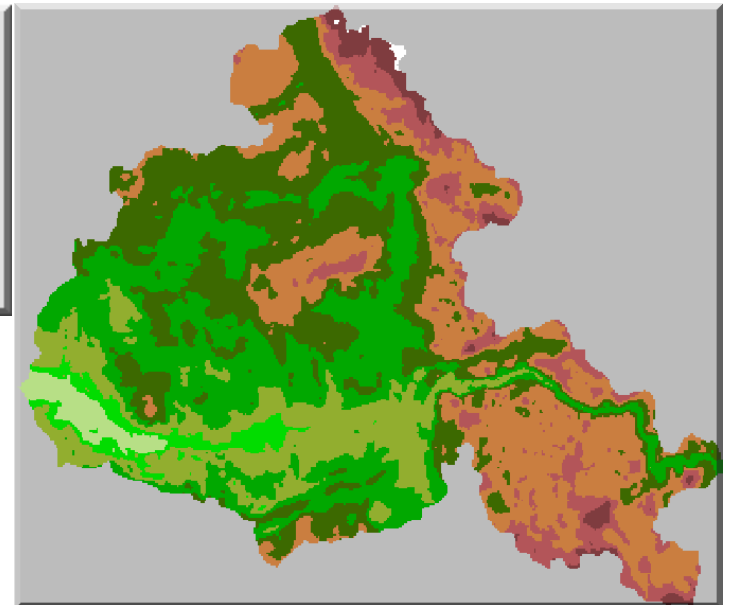
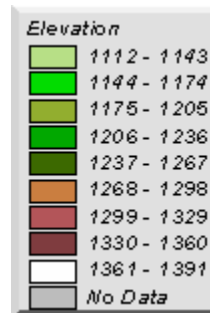
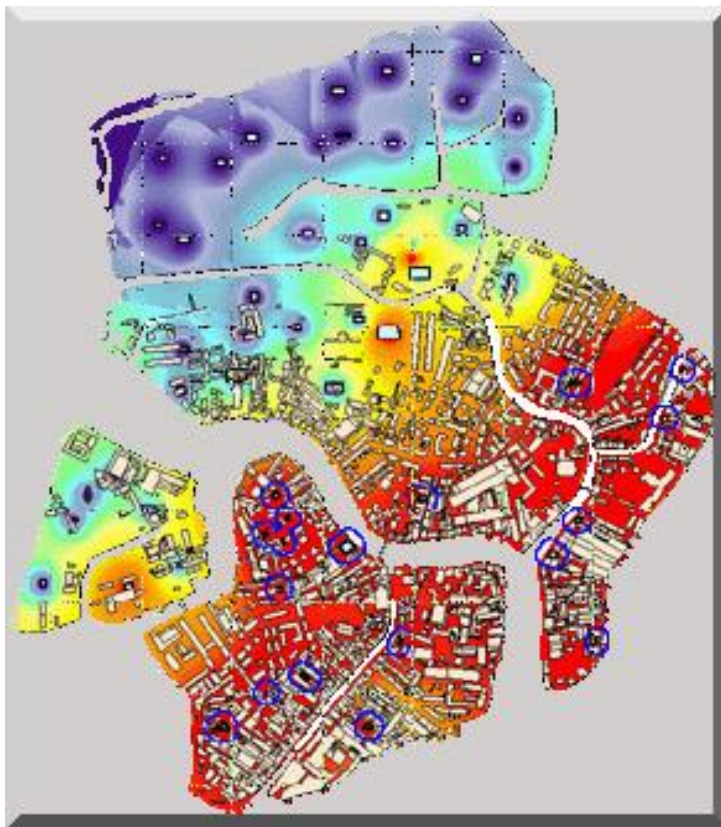
Un'immagine aerea o satellitare può essere georeferenziata, in modo da poter essere appoggiata in modo coerente su altri dati geografici.

7	66	70	67	26	24	30	30	32	28
7	8	77	77	27	26	25	28	27	27
7	9	75	80	89	24	24	28	28	23
7	10	11	83	90	24	27	27	29	26
8	9	90	82	22	24	30	32	26	28
8	9	86	87	24	26	31	32	29	30
8	8	80	83	75	26	27	29	30	31
8	8	10	77	67	25	27	28	31	29
9	10	11	11	22	24	25	27	29	28
7	7	11	10	10	27	25	25	24	21



Un'altra categoria di raster fisici sono quelli ottenuti sulla base di misure discrete di fenomeni che variano con **continuità** come ad esempio la quota del terreno, la pendenza (acclività), la distribuzione della temperatura, la distribuzione del rumore, la copertura del suolo, ecc.

Questi modelli sono ottenuti per interpolazione dei valori misurati.



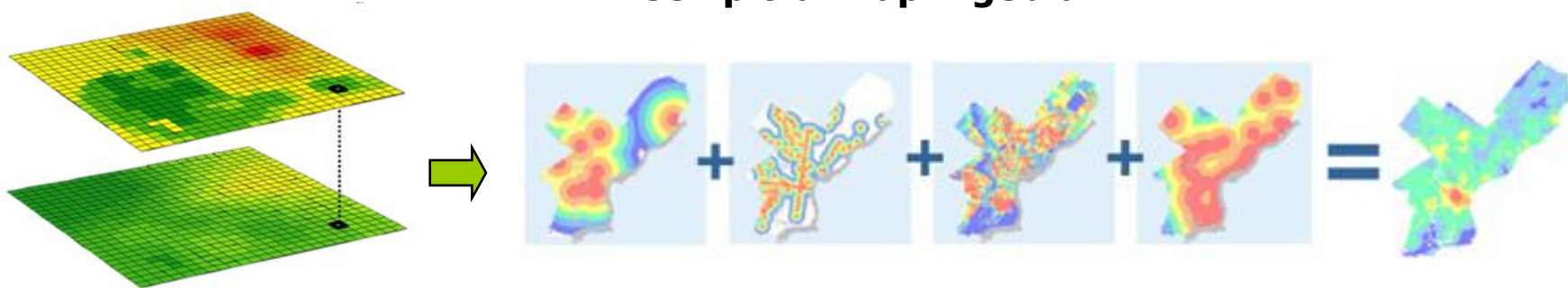
Raster dell'elevazione del Terreno

Raster della zonizzazione acustica in Venezia

Nel caso di un raster fisico, la struttura matriciale del formato GRID consente di modificare e selezionare i dati con semplicità:

- basta conoscere la posizione di una cella all'interno della matrice per poterne modificare il contenuto,
- è sufficiente selezionare tutte le celle di un certo valore per conoscerne subito l'area totale ed evidenziarla sullo schermo;
- attraverso semplici operazioni aritmetiche ed insiemistiche è possibile incrociare tra loro più matrici per ricavarne una nuova che sintetizza il risultato, (**Map Algebra**).

Esempio di Map Algebra

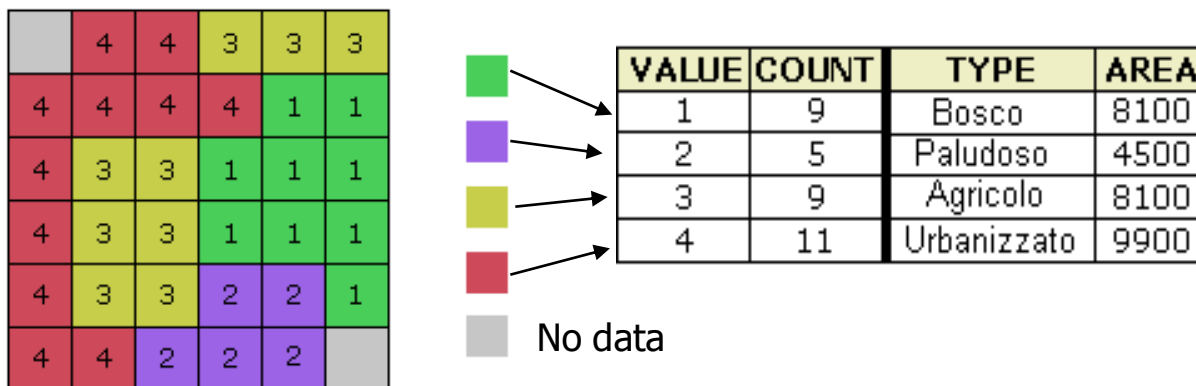


I raster coinvolti nell'operazione di map algebra devono avere tutti la stessa estensione e la stessa risoluzione spaziale.

■ *Raster classificato*

Ad ogni pixel è associato un valore simbolico, che codifica in forma numerica un dato di tipo **qualitativo**.

Esempio: mappa raster della copertura del suolo, dove ogni cella assume un valore numerico intero il cui significato si desume da una tabella associata al raster stesso.



Può essere georeferenziato in modo analogo ad un raster fisico: le coordinate cartografiche di ciascuna cella sono calcolabili essendo note in modo implicito dalla posizione della cella stessa nella matrice.

Un raster classificato si presenta con valori raggruppati in blocchi e senza alcuna idea di continuità, ovvero non sussiste alcuna correlazione spaziale tra blocchi adiacenti.

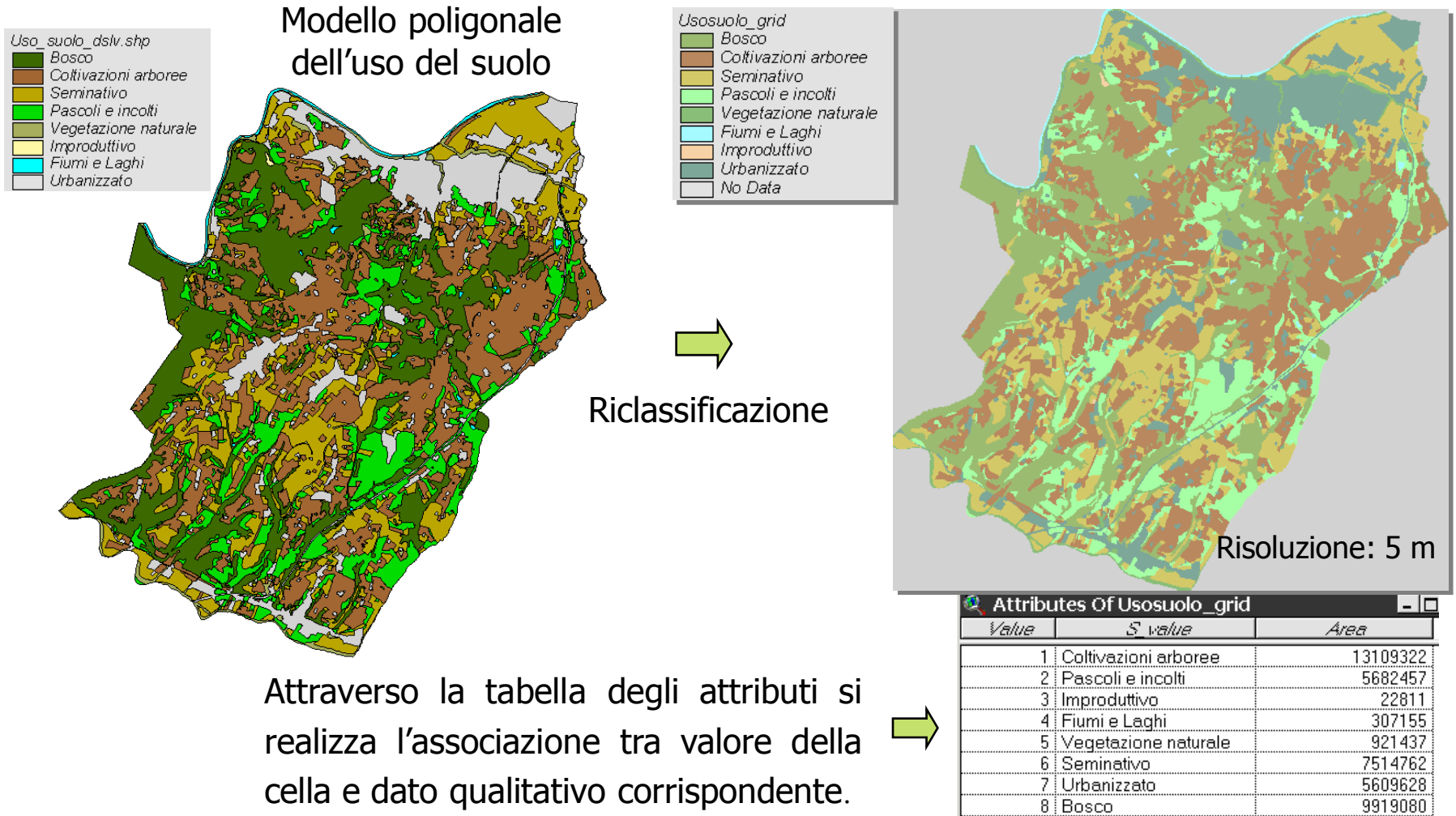
1	2	2	2	3	3	3	3	3	3
1	1	2	2	3	3	3	3	3	3
1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
1	1	1	2	2	3	3	3	3	3
1	1	2	2	3	3	3	3	3	3
1	1	2	2	3	3	3	3	3	3
1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
1	1	1	2	2	3	3	3	3	3
1	1	1	1	3	3	3	3	3	3
1	1	1	1	1	3	3	3	3	3

Poiché la grandezza trattata è discontinua, un raster classificato non è ulteriormente interpolabile.

Generalmente è ottenuto da un raster fisico come risultato di una **riclassificazione**, operazione tramite la quale viene creata la tabella che contiene il collegamento tra cella e relativo valore dell'attributo.

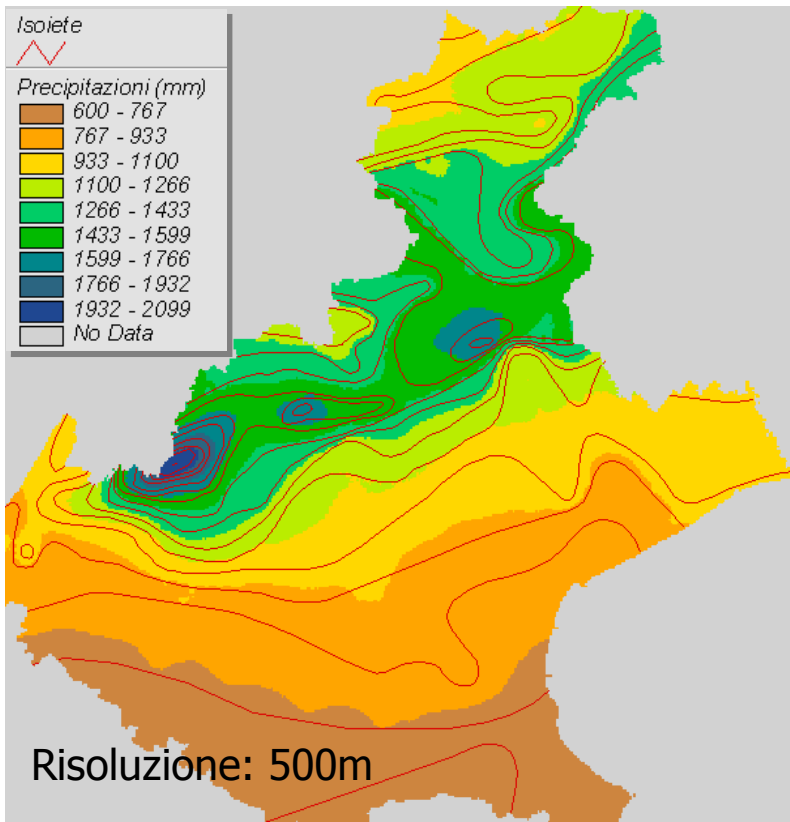
Esempio di raster classificati

Raster dell'uso del suolo ottenuto per riclassificazione di un raster fisico, generato a sua volta da un modello vettoriale poligonale.

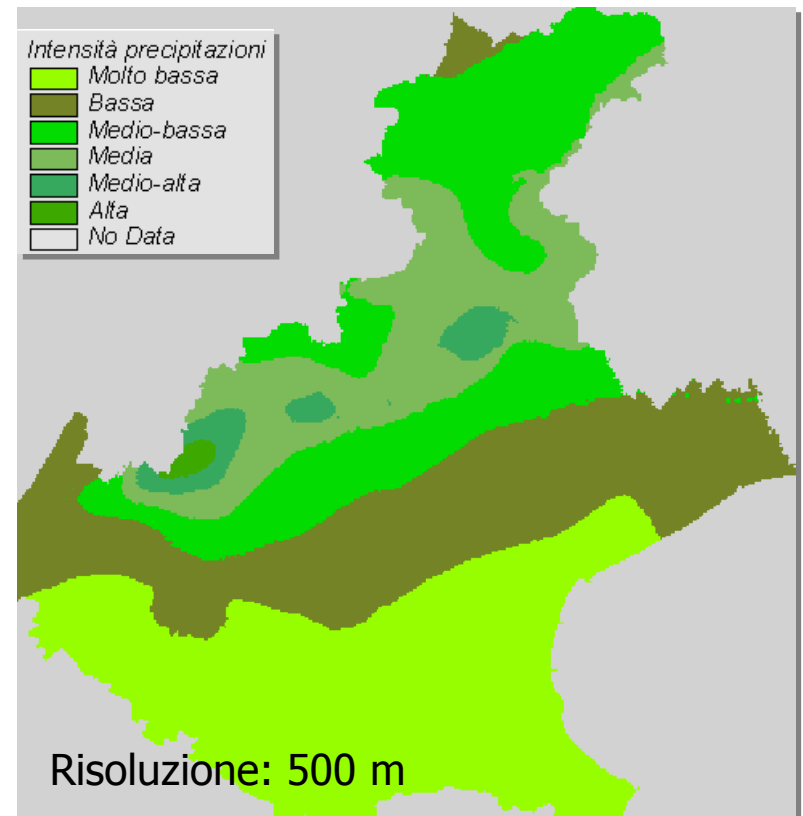


Raster delle precipitazioni in Veneto derivato dalla riclassificazione del raster fisico ottenuto per interpolazione del modello vettoriale lineare delle isoiete.

Modello vettoriale lineare delle isoiete
sovrapposto al corrispondente raster.



Raster riclassificato



- **Raster cartografico**

Documento raster ottenuto dalla digitalizzazione di una cartografia tramite scanner.

Si tratta di un GRID di tipo **binario** nel quale le celle (pixel) possono assumere solo due valori, **1** e **0**, a seconda che nella cella sia presente o meno il tratto grafico della carta.

I valori delle celle sono quindi raggruppati in strutture lineari in funzione della distribuzione dei tratti del pennino sulla carta.

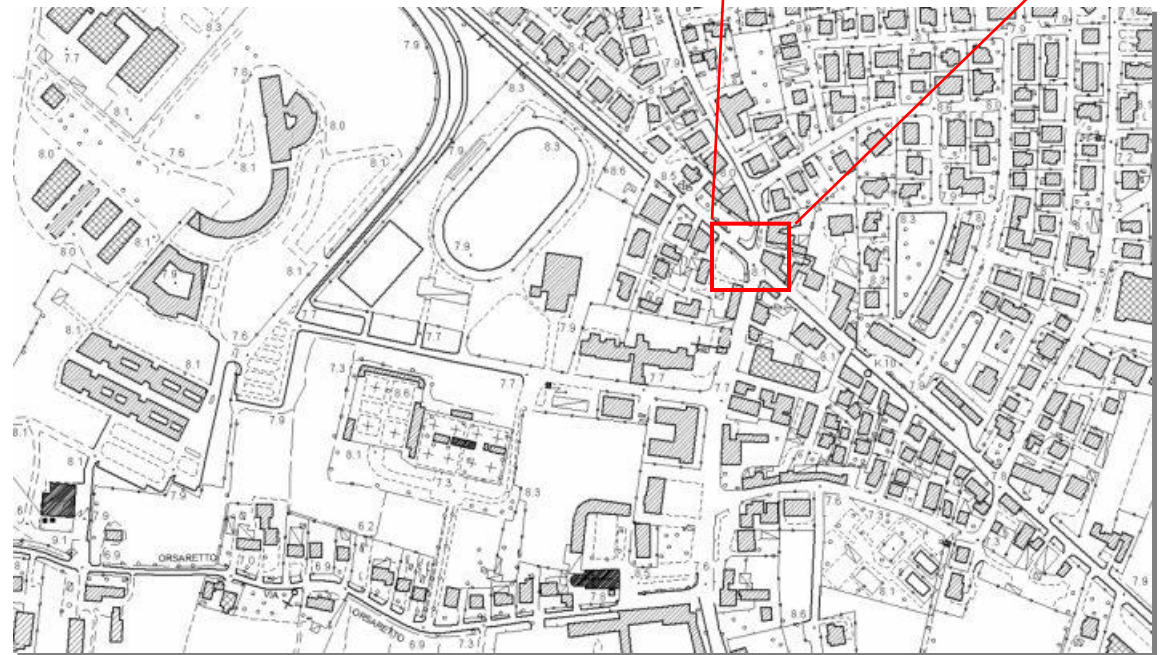
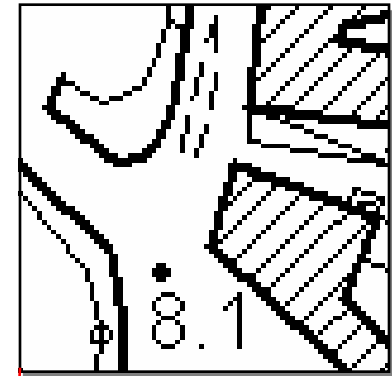
Come per un raster classificato, la grandezza riportata è discontinua e quindi il raster non è interpolabile, però può essere georeferenziato.

La risoluzione si misura in **dpi** (*dot per inches*, punti o pixel/pollice, 1 pollice = 2,54 cm).

Rappresentazione matriciale
del contenuto di una
cartografia raster

1	0	0	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0	0
1	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0

Ingrandimento della zona
contornata dal rettangolo in
cui si evidenzia la struttura
raster dell'informazione.



- **Raster fotografico**

Con tale termine si indicano le comuni fotografie che, all'interno di un GIS, possono essere usate per documentare oggetti di particolare interesse.

Ad esempio immagini fotografiche di ciminiere, edifici, monumenti possono essere utilizzate per creare catasti georeferenziati di tipo ambientale, per applicazioni urbanistiche, per strumenti di ottimizzazione dei percorsi turistici.

L'immagine è memorizzata secondo uno dei vari formati commerciali (BMP, GIF, JPG, TIFF, ecc.) e viene visualizzata in un'apposita finestra quando necessario.

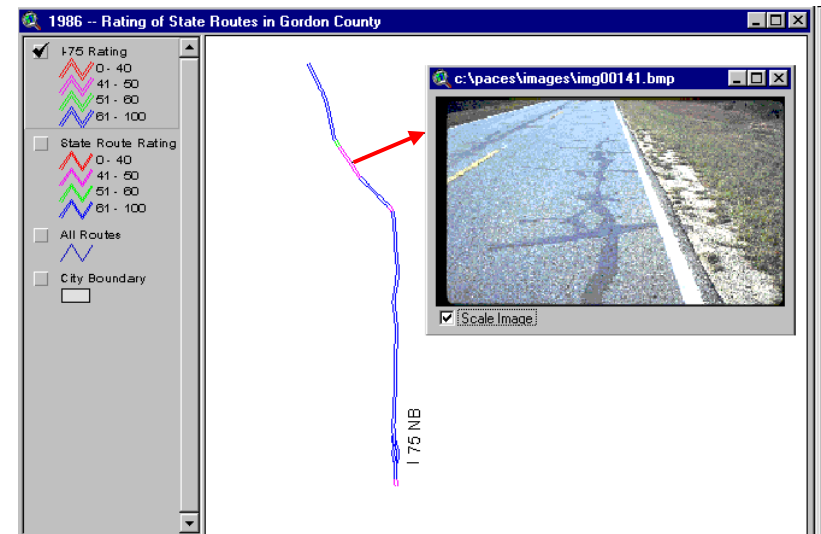
Sull'immagine non si fanno elaborazioni, ma solo eventuali interventi per migliorarne la qualità.

Anche in questo caso la risoluzione del raster immagine si misura in dpi.

Le immagini fotografiche vengono georeferenziate in modo diverso dalle precedenti tipologie di raster.

Mentre prima ogni pixel era associabile ad una coppia di coordinate, in questo caso tutta l'immagine viene associata ad un'entità.

La foto viene trattata come attributo ed associata ad una primitiva geometrica, di solito un punto, già presente nell'archivio GIS oppure creata appositamente. In quest'ultimo caso il punto, e quindi l'intera foto, hanno le coordinate cartografiche dell'entità territoriale.



Le principali caratteristiche delle varie tipologie di raster GRID descritte in precedenza sono riassunte nella tabella seguente.

Tipologia di Raster	Visualizzazione	Classif.	Interp.	Risoluzione	Georef.
Fisico	SI (come dato spaziale)	SI	SI	metri o dpi*	Completa
Classificato	SI (come dato spaziale)	NO	NO	metri	Completa
Cartografico	SI (come dato spaziale)	NO	NO	dpi	Completa
Fotografico	SI (solo come attributo)	NO	NO	dpi	Punti privilegiati

* Nel caso di immagini satellitari o foto aeree la risoluzione può essere indicata in modo diverso a seconda della caratteristica che si considera preminente:

- come fonte di dati spaziali → **metri**
- come semplice immagine fotografica → **dpi**

Caratteristiche del modello vettoriale

- I dati sono rappresentabili nella loro forma e risoluzione originale, senza applicare generalizzazioni.
- L'output grafico risulta di solito esteticamente più gradevole (rappresentazione cartografica tradizionale).
- Non è necessaria alcuna conversione dei dati, poiché la maggior parte di essi è disponibile in forma vettoriale.
- L'accuratezza nel posizionamento geografico dei dati viene mantenuta.
- Struttura dati più complessa del raster. E' necessario memorizzare esplicitamente le coordinate di ciascun vertice.

- E' utile per descrivere fenomeni **discreti** (es. rete di collegamento stradale o di distribuzione dell'energia elettrica), ma è meno adatto per descrivere fenomeni **continui**, (es. temperatura, precipitazioni, quota, ecc.).
- Consente una codifica più efficiente della topologia e di conseguenza una più efficace esecuzione delle operazioni che si basano su di essa (es. prossimità, analisi di reti, ecc.).
- La topologia è però **statica**, quindi qualsiasi aggiornamento o modifica dei dati vettoriali richiede la sua rigenerazione.
- Presenta maggiori difficoltà di elaborazione nelle operazioni di sovrapposizione (*overlay*) tra primitive geometriche differenti (es. linea su poligono).
- L'elaborazione e l'analisi dei dati vettoriali sono operazioni complesse e spesso computazionalmente pesanti. A volte ciò può limitare l'impiego di un elevato numero di features.

Caratteristiche del modello Raster

- La posizione geografica di ogni cella è implicitamente individuata dalla sua posizione nella matrice. Dal punto di vista dell'informazione geografica la struttura richiede quindi solo la memorizzazione delle coordinate di un punto origine (normalmente l'angolo inferiore sinistro).
- E' adatto a visualizzare fenomeni naturali e antropici che variano con **continuità** (ad es. l'andamento del terreno o le variazioni graduali di vegetazione, la densità di popolazione, ecc).
- Data la metodologia di memorizzazione dei dati, l'analisi dei dati è facilmente implementabile e veloce da eseguire (si lavora con matrici).
- La struttura semplice, di tipo matriciale, del formato GRID consente di implementare le operazioni di *overlay* (Map Algebra) con facilità ed efficienza, rendendo tale formato di rappresentazione adatto alla modellazione matematica e all'analisi quantitativa.

- E' caratterizzato da un'inevitabile ridondanza dei dati nelle zone in cui il valore dell'attributo mappato è omogeneo.
- Poiché la maggior parte dei dati sono espressi in forma vettoriale, i dati devono essere sottoposti ad una **conversione vector ⇒ raster**.
- Le unità geometriche di base (punto, linea, poligono) vengono "espansse" su gruppi di pixel, producendo i seguenti effetti negativi:
 - perdita di precisione della posizione geografica e capacità di dettaglio rispetto al modello vettoriale,
 - difficoltà di gestione della topologia,
 - problemi relativi all'integrità dei dati a causa dell'inevitabile effetto di **discretizzazione** delle primitive geometriche e di un'eventuale scelta errata della dimensione della cella.
- E' possibile migliorare il livello di dettaglio aumentando la risoluzione, ossia utilizzando un maggior numero di celle/pixel, a scapito però di un notevole aumento di memoria richiesta per l'archiviazione del modello.

Confronto tra Raster e Vector - 1

	Dati raster	Dati vettoriali
Struttura dati	Relativamente semplice. Con righe e colonne definiscono una griglia uniforme di celle	Linee, punti e poligoni con relazioni topologiche
Origine	In basso a sinistra	Dipende dal sistema di riferimento cartografico adottato
Coordinate	Solo l'origine è georeferenziata; per gli altri punti è ricalcolata se necessario	Sono memorizzate le coordinate reali x, y per tutti gli elementi
Risoluzione	Dipende dalla dimensione della cella	Dipende dalla metodologia di acquisizione e dalla scala del dato sorgente
Attributi	Il valore è legato alla posizione nella griglia	Ogni elemento ha un identificatore univoco che lo lega ad un attributo
Memorizzazione	Necessita molta memoria ma i dati sono compressi dove possibile	Generalmente più compatti dei raster
Relazioni topologiche	Difficoltà di rappresentazione	Facilità di rappresentazione
Sovrapposizione	Facilmente implementabili, molto efficienti. I valori delle celle sono sommati insieme	Difficilmente implementabili; occorrono più elaborazioni. Gli attributi legati restano distinti
Dati sorgenti	Dati continui: elevazione, tipo di suolo, temperatura	Dati discreti (perimetrabili): idrografia, limiti amministrativi, linee elettriche

Confronto tra Raster e Vector - 2

In una mappa vettoriale è possibile ingrandire o ridurre il disegno a proprio piacimento, mantenendo inalterata la capacità di visualizzazione degli elementi geometrici costitutivi (punti, linee, poligoni, testi e simboli).

In una fotografia aerea o satellitare, invece, la lettura dei vari fenomeni territoriali si realizza attraverso la colorazione dei vari punti (pixel) di cui è costituita l'immagine.

La significatività del singolo pixel resta però limitata, attraverso il fattore di scala, alla sua dimensione fisica reale.

Ciò comporta che applicando ingrandimenti (*zoom*) via via crescenti, l'immagine tende a "sgranarsi" sempre di più rivelando la dimensione finita e non puntuale del pixel. Oltre tale livello di zoom l'immagine non comunica più informazione, l'utente non è più in grado di riconoscere i vari elementi geografici come entità a sé stanti.

Modello vettoriale sovrapposto ad un raster fisico (ortofoto, ris. 1 m)



Scala di visualizzazione 1:5000

Aumentando la scala di visualizzazione (zoom) oltre il fattore di scala per il quale l'immagine raster è stata concepita, il pixel inizia a perdere la sua connotazione di elemento puntuale dell'immagine.



Scala di visualizzazione **1:1000**

Aumentando ulteriormente la scala di visualizzazione, l'immagine tende a scomporsi nei singoli pixel rendendo sempre più difficile la sua interpretazione. Viceversa il contenuto informativo proprio degli elementi vettoriali resta inalterato.



Scala di visualizzazione **1:500**

Il modello TIN

Il TIN (**Triangular Irregular Network**) è un modello di rappresentazione in cui l'area in oggetto è piastrellata (*tessellata*) mediante una serie connessa di triangoli di dimensione variabile, disposti irregolarmente nello spazio.

I vertici dei triangoli costituiscono i **nodi** del modello e rappresentano i campioni misurati: nella costruzione di un TIN non interviene alcuna interpolazione dei dati originari.

I TIN sono utilizzati in ambito GIS esclusivamente per rappresentare l'andamento della superficie del terreno attraverso visualizzazioni sia bidimensionali (viste in pianta) sia tridimensionali.

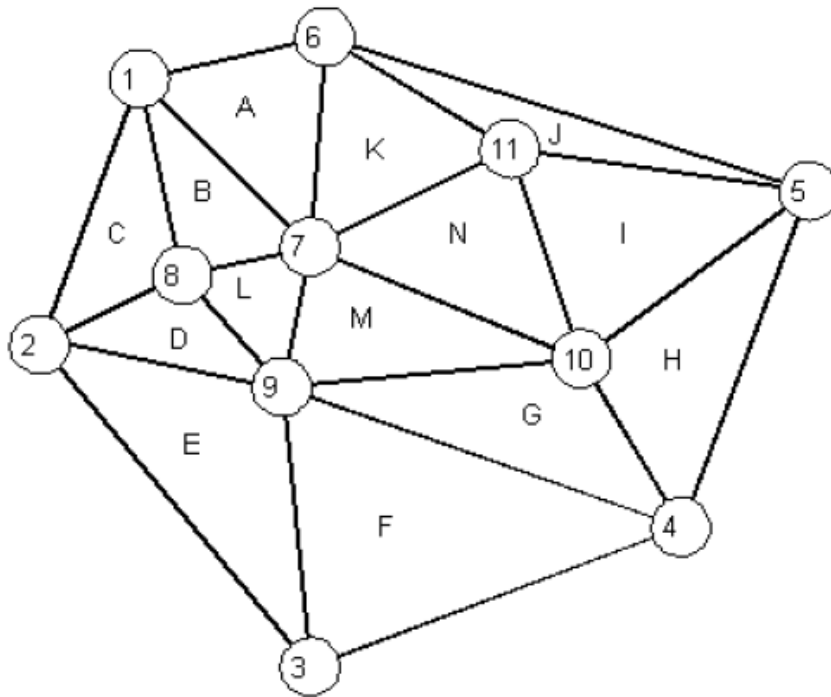
Un TIN può essere ottenuto da fonti diverse, purché dotate di informazione altimetrica; le più comuni sono:

- curve di livello
- insiemi di punti quotati

Componenti di un TIN

- Nodi:** sono gli stessi punti campione e costituiscono i vertici dei triangoli. Ciascun nodo deve avere un valore di quota Z.
- Bordi:** sono le linee che rappresentano i lati dei triangoli. Ogni bordo ha due nodi, ma un nodo può essere collegato a più bordi.
- Triangoli:** ciascuna "faccetta" triangolare descrive l'andamento di una porzione della superficie del TIN. Dalle coordinate X, Y, Z dei tre vertici è possibile derivare delle informazioni quali la pendenza, l'esposizione, area e perimetro della relativa superficie.
- Topologia:** definisce l'insieme dei legami tra nodi, bordi e triangoli mediante la quale viene memorizzata la struttura dati del TIN.

Esempio di struttura dati di un TIN



- ID del triangolo;
- numero di triangoli adiacenti;
- vertici del triangolo;
- coordinate X, Y, Z di ciascun nodo.

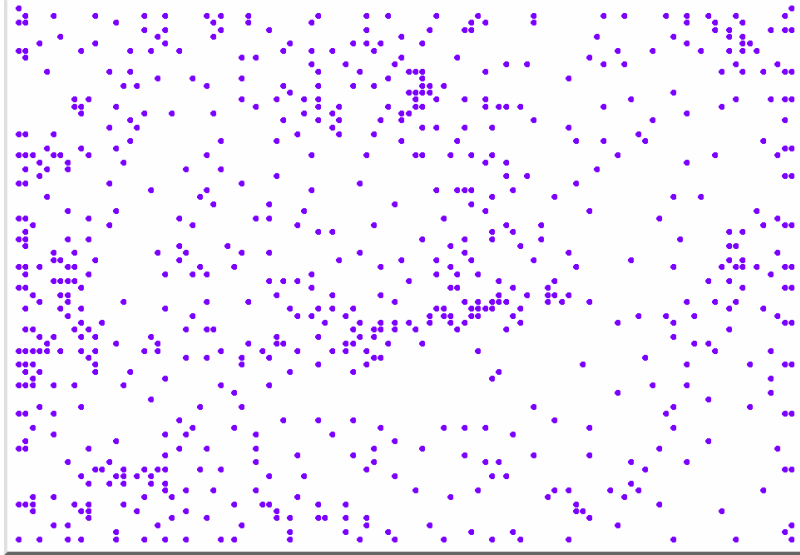
Coordinate X-Y	
node#	coordinates
1	x1, y1
2	x2, y2
3	x3, y3
...	...
11	x11, y11

Coordinate Z	
node#	z_value
1	z1
2	z2
3	z3
...	...
11	z11

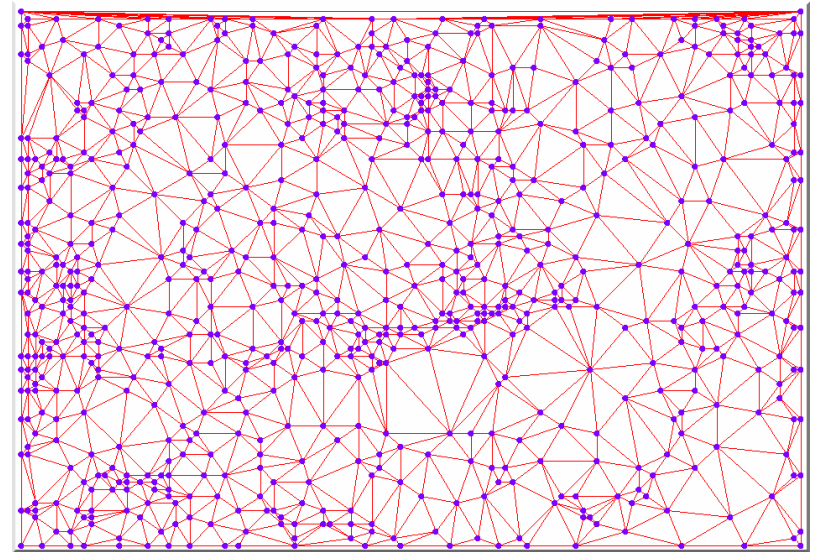
Triangoli	
△	adiacente △
A	B, K
B	A, C, L
C	B, D
D	C, E, L
E	D, F
F	E, G
G	F, H, M
H	G, I
I	H, J, N
J	I, K
K	A, J, N
L	B, D, M
M	G, L, N
N	I, K, M

Nodi	
△	nodo #
A	1, 6, 7
B	1, 7, 8
C	1, 2, 8
D	2, 8, 9
E	2, 3, 9
F	3, 4, 9
G	4, 9, 10
H	4, 5, 10
I	5, 10, 11
J	5, 6, 11
K	6, 7, 11
L	7, 8, 9
M	7, 9, 10
N	7, 10, 11

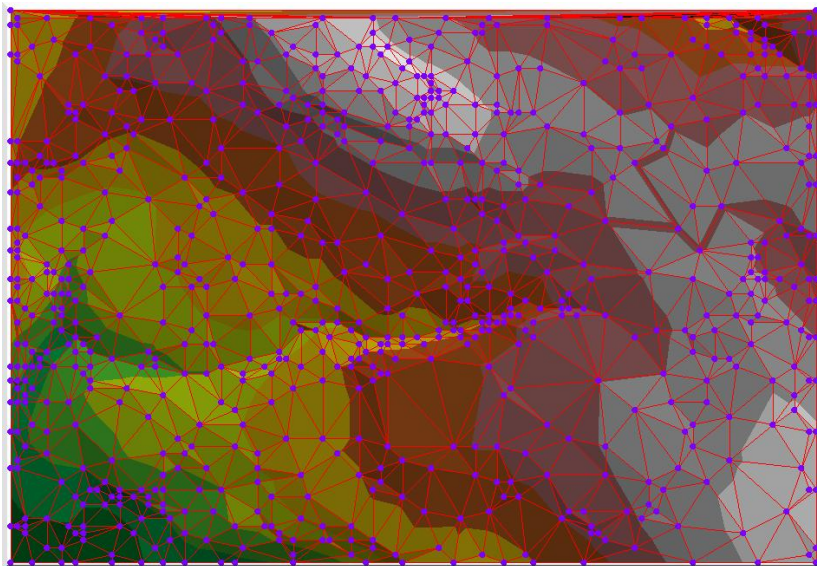
Passo 1: Semina di punti (nodi del Tin)



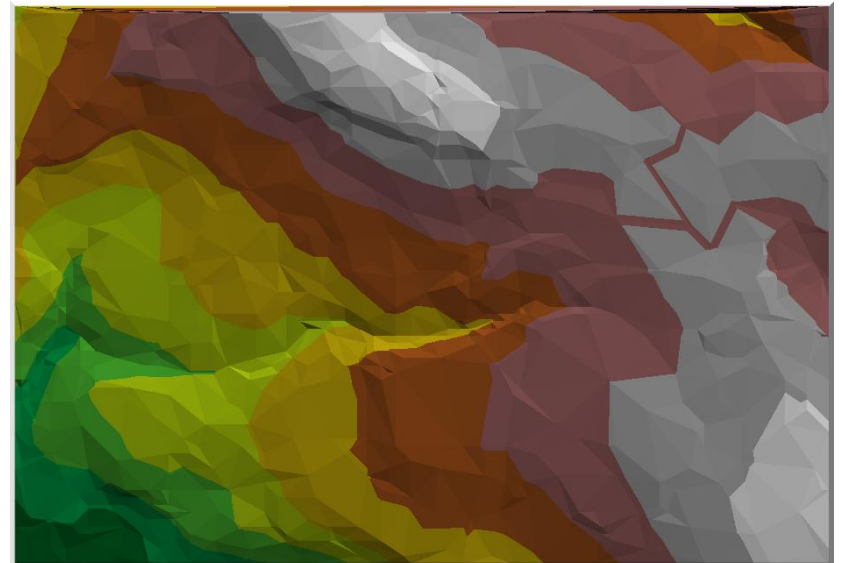
Passo 2: Triangolazione dei punti



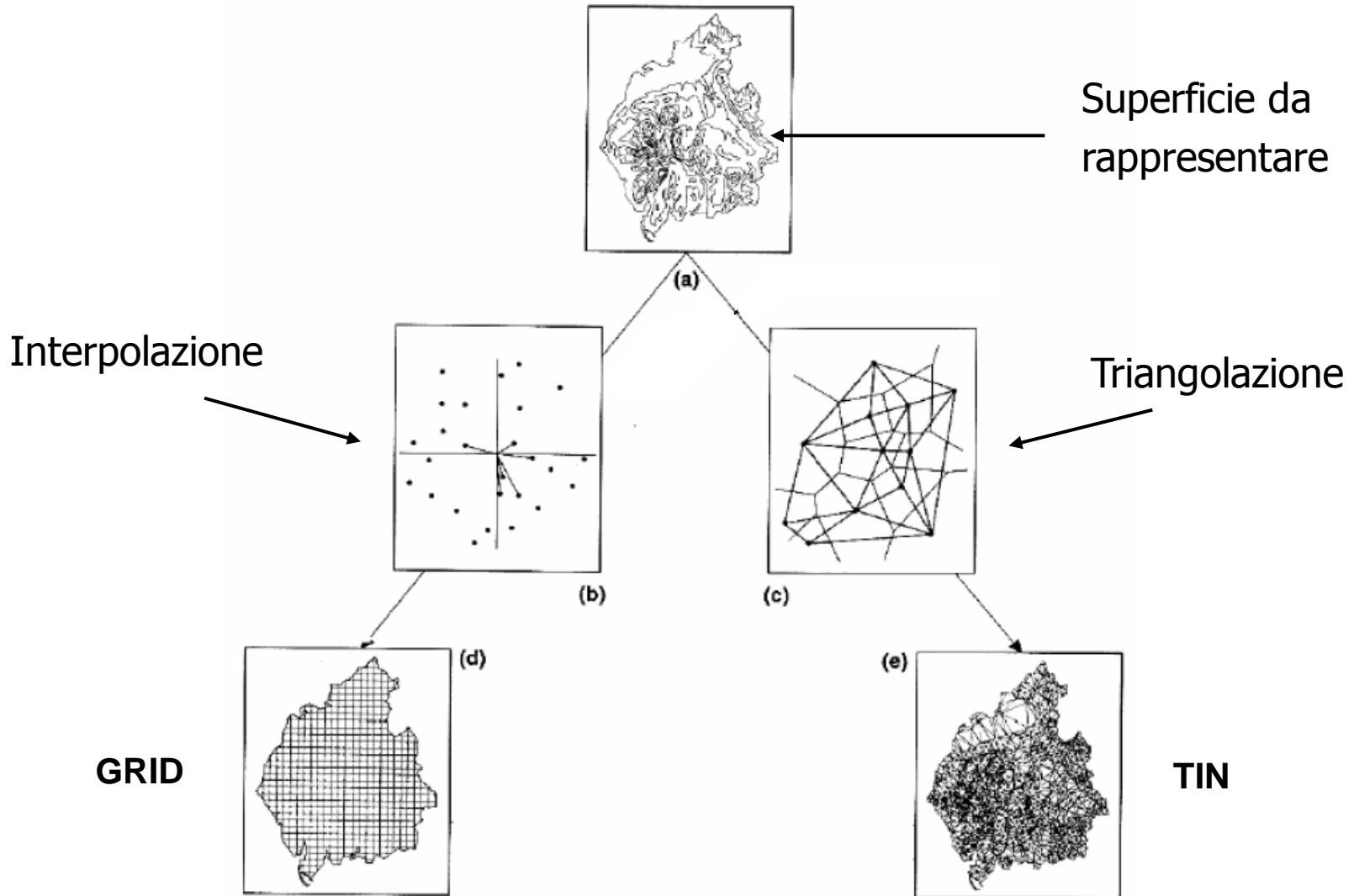
Passo 3: Colorazione dei triangoli



Passo 4: Risultato finale

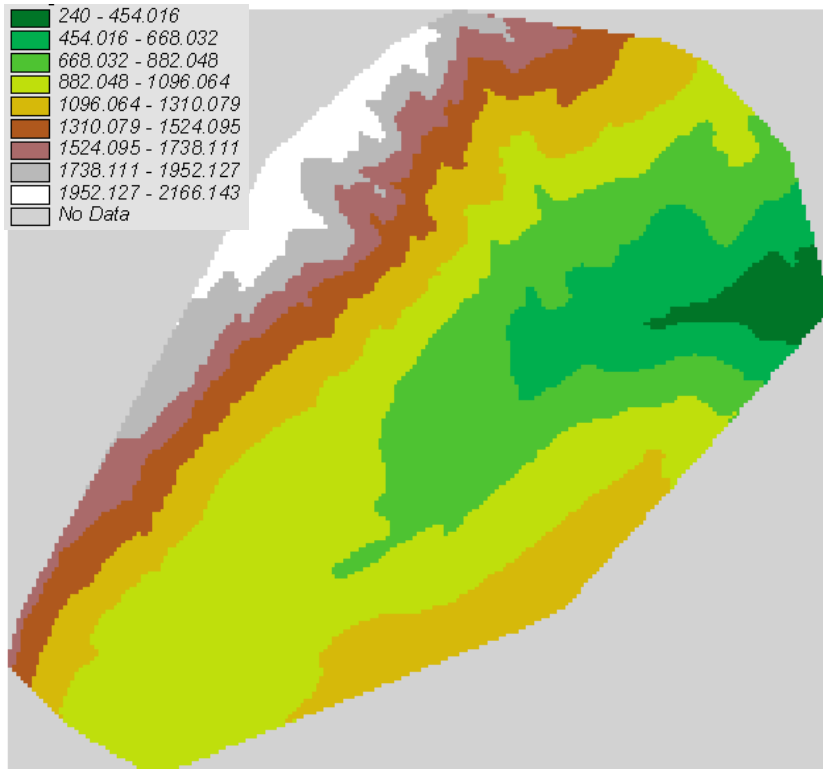


Confronto tra GRID e TIN - 1

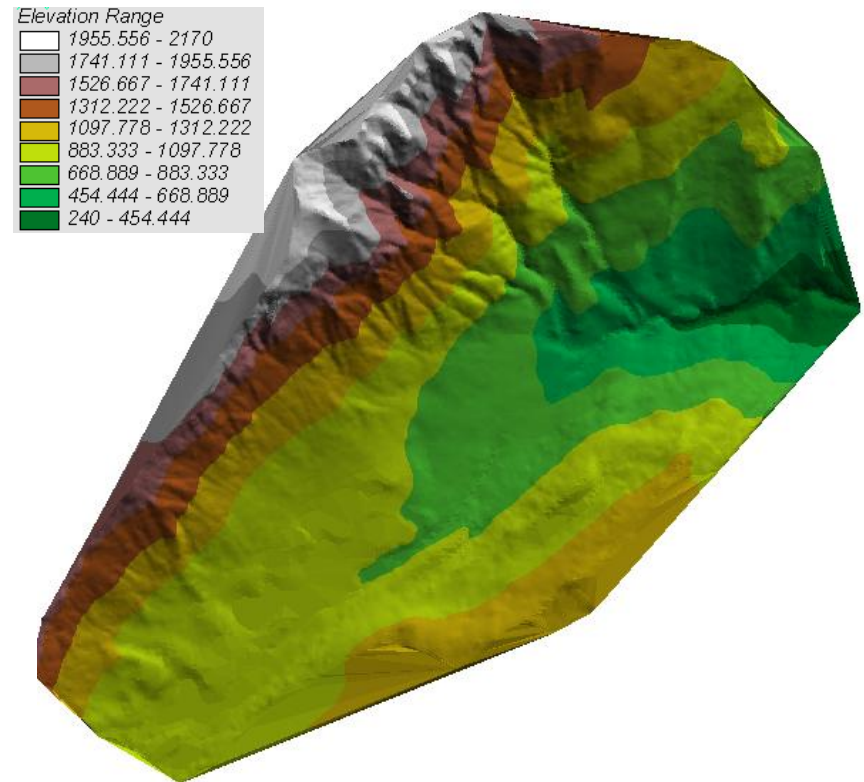


Confronto tra GRID e TIN - 2

GRID



TIN



Un modello GRID tende a mostrare un territorio più "arrotondato" rispetto al modello TIN, che risulta invece più "spigoloso" data la maggiore vocazione del TIN ad evidenziare le discontinuità orografiche.

Confronto tra GRID e TIN - 3

La dimensione variabile dei triangoli si traduce in un modello a **risoluzione variabile**.

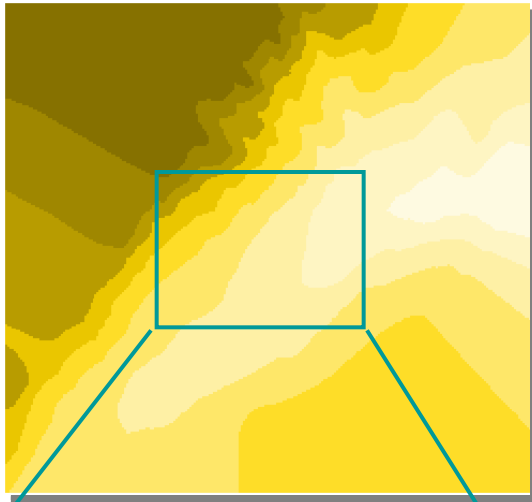
La risoluzione variabile consente di rappresentare la superficie vera in modo più efficiente rispetto al modello GRID.

Infatti la densità dei punti può essere adattata al livello di complessità locale della superficie, secondo la seguente strategia:

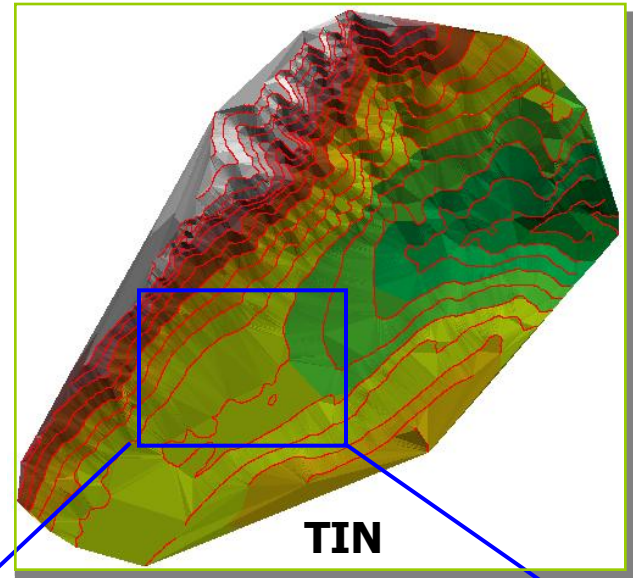
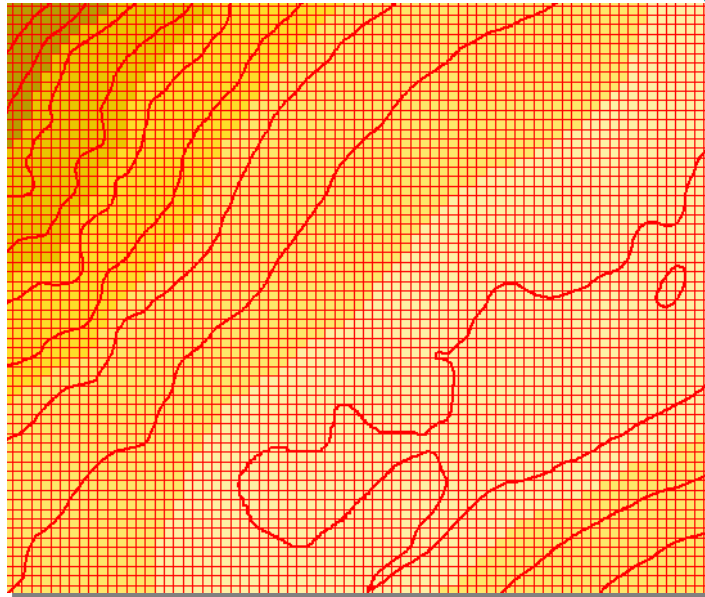
- più punti per i terreni accidentati (zone in cui la superficie del terreno varia più rapidamente),
- minor numero di punti per i terreni con pendenze che variano dolcemente (zone in cui la superficie è più omogenea).

Il modello GRID non essendo adattabile, può tendere a semplificare troppo le superfici montuose e a rappresentare con sovrabbondante numero di punti quelle pianeggianti.

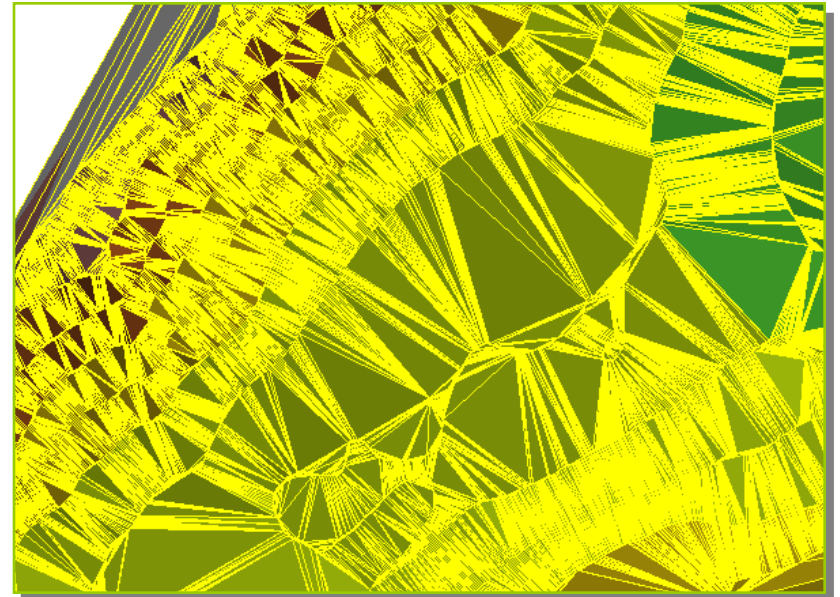
Esempio



GRID



TIN

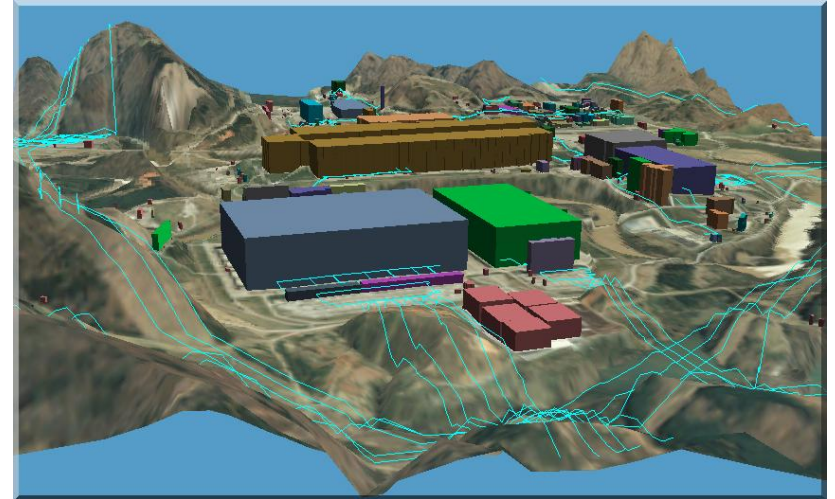


TIN e visualizzazione 3D

Il TIN viene spesso utilizzato per produrre modelli tridimensionali dell'area di studio all'interno dei quali l'utente può "navigare" con appositi strumenti, similmente a quanto accade in ambienti di Realtà Virtuale.

La qualità della rappresentazione grafica può essere incrementata sovrapponendo al modello della superficie

- un'ortofoto della zona (*drappeggio*);
- elementi vettoriali relativi ad entità sia naturali (es. alberi) che artificiali (es. strade, edifici), trasformati poi in oggetti solidi tramite estrusione.



Caratteristiche del TIN

- Nella creazione di un TIN non viene eseguita alcuna interpolazione, quindi non si creano nuovi dati bensì si utilizza solo l'insieme delle osservazioni originali.
- La densità dei punti corrisponde ai dati originariamente misurati.
- Si presta bene a rappresentare il terreno in zone caratterizzate da brusche variazioni della pendenza (es. zone montuose), dove i bordi del TIN possono essere allineati con le discontinuità del terreno (es. lungo canali, linee di cresta ecc.).
- Consente di ridurre la ridondanza dei dati rispetto ad un raster GRID.
- Si presta ottimamente ad essere utilizzato nelle rappresentazioni 3D.
- Richiede una maggior quantità di memoria rispetto al GRID perché devono essere memorizzate le tre coordinate di tutti i vertici.

Modelli Digitali del Terreno

Un particolare tipo di applicazione dei modelli Raster GRID e TIN riguarda la creazione di modelli digitali dell'elevazione (**DEM**), o modelli digitali del terreno (**DTM**).

Si tratta di modelli che descrivono la continuità della superficie terrestre attraverso una quantità finita di punti memorizzati sottoforma di triplette di coordinate (X, Y, Z).

Il termine DEM viene spesso utilizzato quando l'elevazione della superficie topografica è modellata tramite raster **GRID**, cioè tramite una matrice regolare di valori di quota.

Viceversa l'acronimo DTM spesso sottintende la modellazione della superficie del terreno attraverso la struttura **TIN**.

Tuttavia oggi questi due termini (DEM e DTM) sono usati come sinonimi.

La possibilità di modellare il terreno attraverso un raster o un TIN consente di eseguire alcune analisi relative alla natura tridimensionale della superficie rappresentata.

In particolare da un DEM o DTM è possibile derivare i seguenti prodotti:

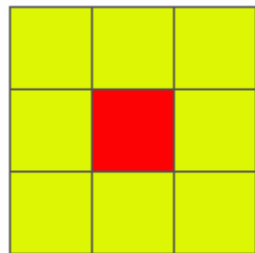
- Curve di livello (***Contour***),
- Raster delle pendenze (***Slope***),
- Raster delle esposizioni (***Aspect***),
- Raster dell'illuminazione solare relativa (***Hillshade***),
- Raster dell'intervisibilità (***Viewshed***),
- Calcolo di variazioni di volume (***Cut & Fill***),
- Calcolo di area e volume.



Raster delle Pendenze - Slope

La pendenza descrive la massima variazione di quota tra una cella e le sue otto adiacenti.

Può essere espressa in gradi o in percentuale.

Se il dato di input è un TIN, questo viene prima convertito in un GRID.

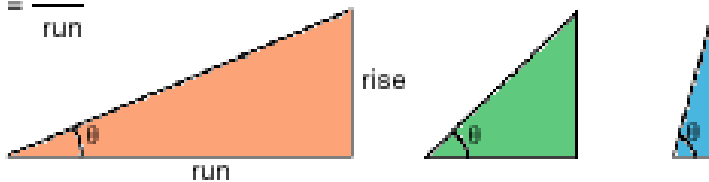


-  Celle adiacenti
-  Cella di calcolo

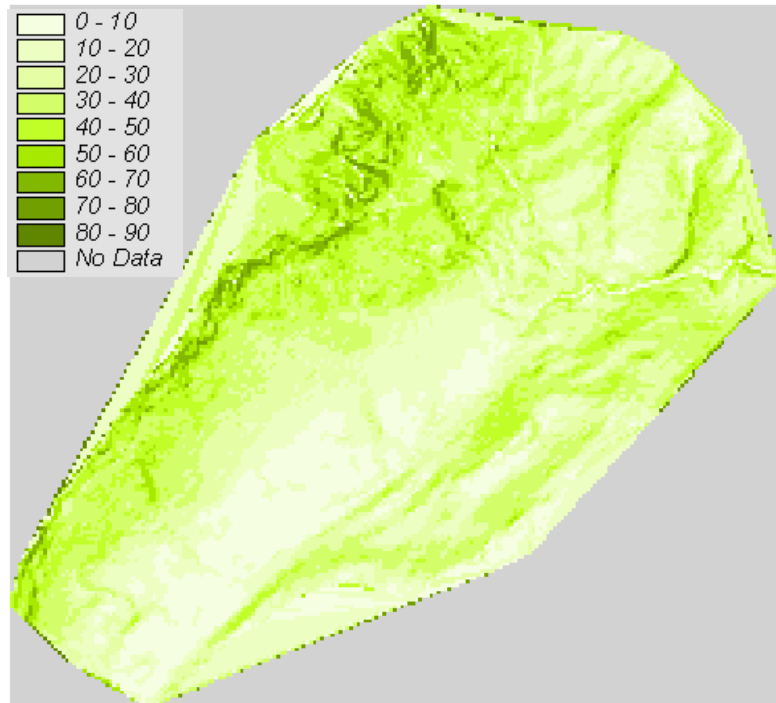
Degree of slope = θ

$$\text{Percent of slope} = \frac{\text{rise}}{\text{run}} \times 100$$

$$\tan \theta = \frac{\text{rise}}{\text{run}}$$



Degree of slope =	30	45	76
Percent of slope =	58	100	375



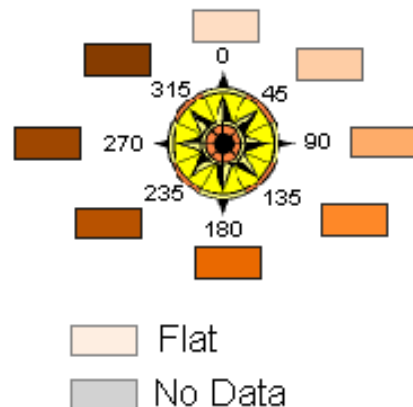
Raster delle Esposizioni - Aspect

L'esposizione di una superficie esprime l'orientamento dei versanti rispetto ai punti cardinali. Può essere considerato come il calcolo della direzione della pendenza.

Non ha significato per le superfici parallele al piano orizzontale (*Flat*).

Si misura in gradi ($0^{\circ}/360^{\circ}$).

Se il dato di input è un TIN, questo viene prima convertito in formato GRID.

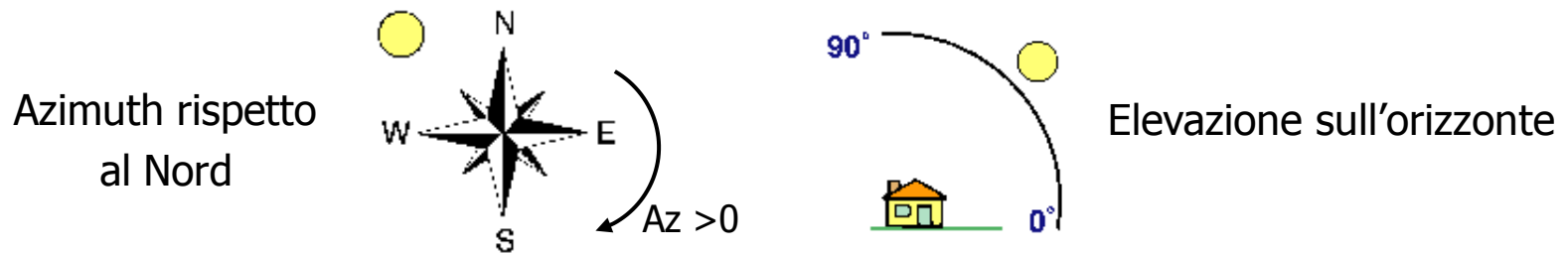


Raster delle Ombreggiature - Hillshade

A partire da dati altimetrici si produce un raster che simula l'intensità di illuminazione con un effetto di ombreggiatura.

Ciascuna cella ha un valore (intero) in scala di grigio variabile tra 0 (nero: completamente in ombra) a 255 (bianco: completamente illuminata).

La colorazione viene assegnata alle celle in funzione della direzione di illuminazione del sole, combinazione di Azimuth (angolo rispetto al Nord, misurato positivamente in senso orario) e angolo di elevazione sull'orizzonte.

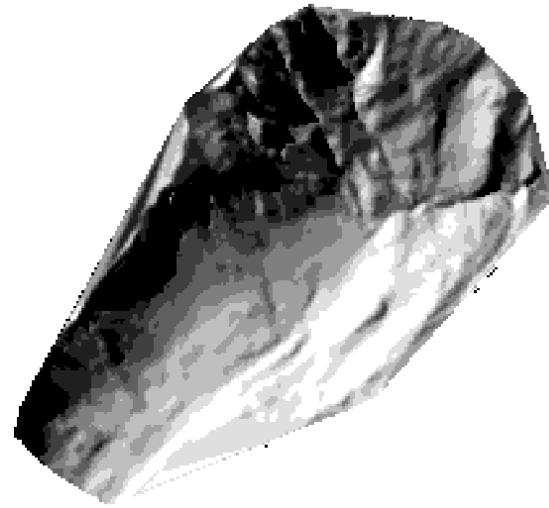


Questo tipo di modello raster può poi essere utilizzato per dare una ombreggiatura al raster sorgente e produrre nell'osservatore l'impressione del rilievo del terreno.

Azimuth: 200° Elevazione: 30°



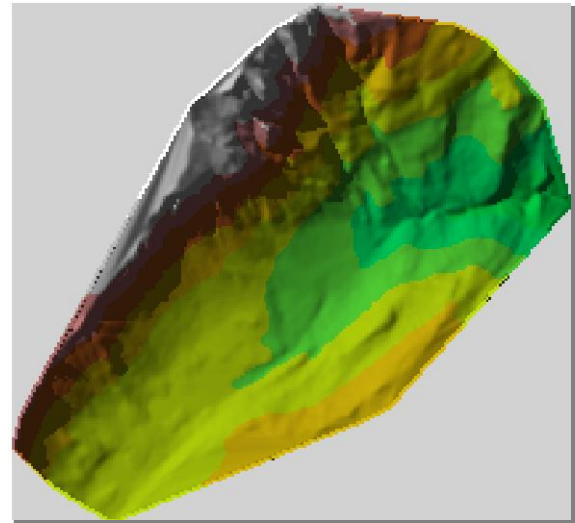
Azimuth: 300° Elevazione: 45°



Azimuth: 100° Elevazione: 45°



Raster sorgente + Hillshade



Raster della visibilità - Viewshed

Una **viewshed** identifica le celle di una copertura raster che possono essere viste da uno (o più) punti di osservazione.

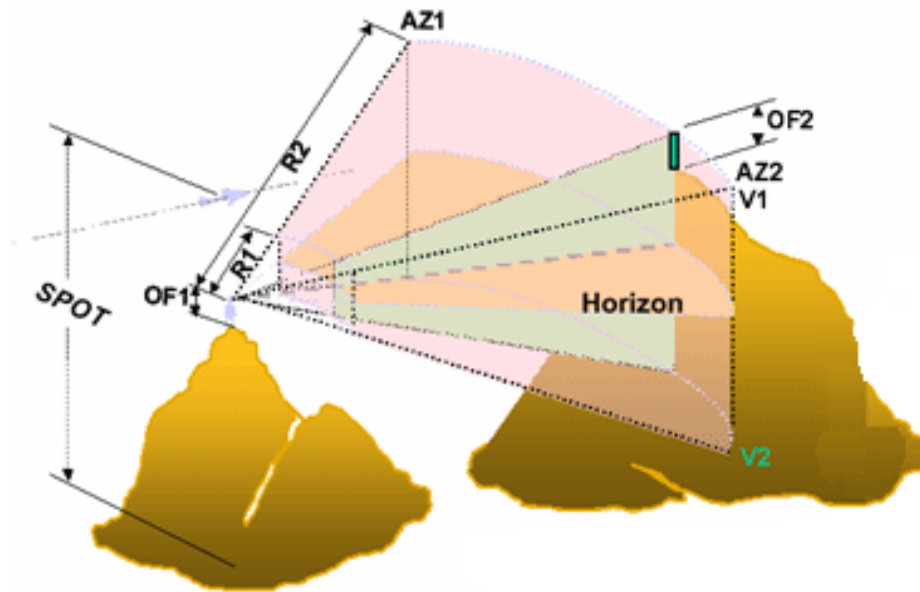
Si distinguono due diversi tipi di analisi di visibilità:

- a) singolo punto di osservazione (es. punto panoramico) → si determinano le celle che possono essere viste da quel punto (a queste viene attribuito il valore 1, alle altre celle che non possono essere viste da quel punto viene attribuito il valore 0);
- b) più punti di osservazione (es. strada, radura, ecc.) → ogni cella del raster di output riceve un valore che indica quanti punti possono essere visti da quella cella.

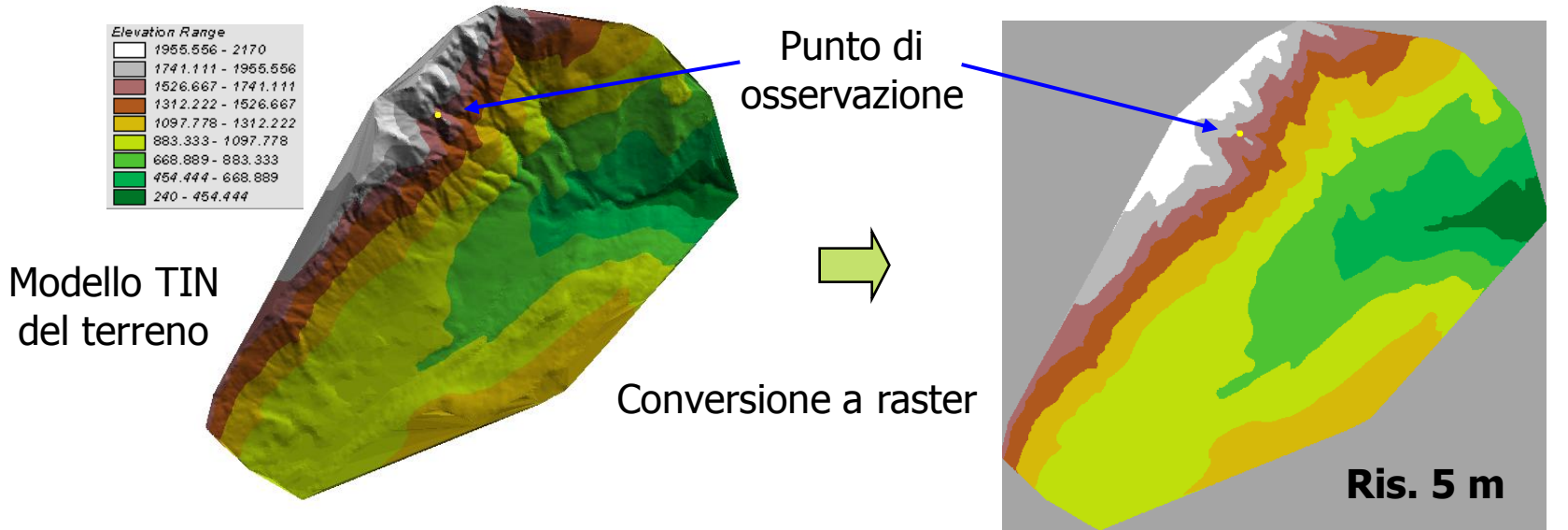
Si tratta della relazione **duale** della precedente: l'oggetto del calcolo infatti non è più la cella bensì gli stessi punti di osservazione.

E' possibile controllare il il calcolo della visibilità attraverso otto parametri:

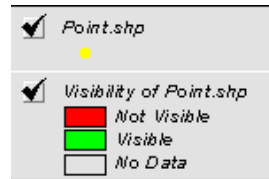
- Offset verticale dell'osservatore rispetto al terreno (OF1);
- Offset verticale di ogni cella considerata per la visibilità (OF2);
- Campo di vista orizzontale dell'osservatore (angoli AZ1 e AZ2);
- Campo di vista verticale dell'osservatore (angoli V1 e V2);
- Distanza minima (R1) e massima (R2) entro cui individuare le aree visibili da ciascun punto di osservazione.



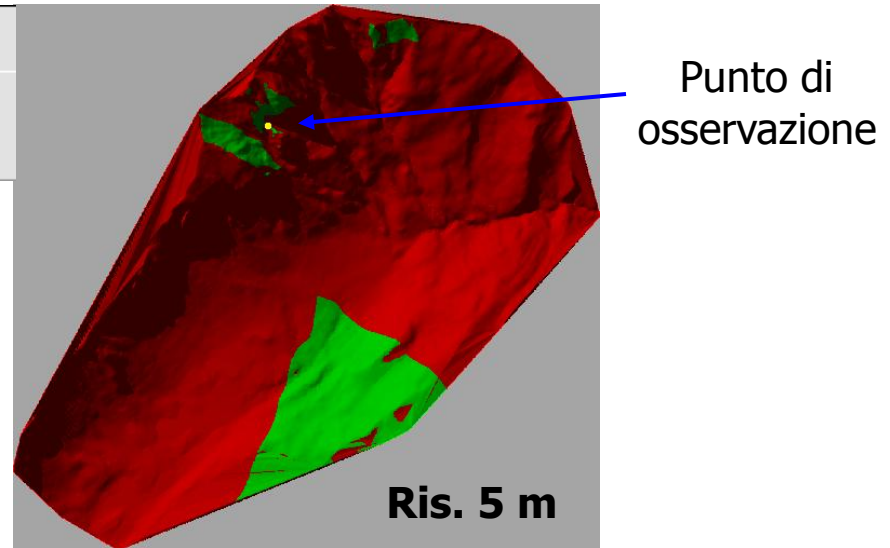
Esempio di calcolo della visibilità per singolo punto di osservazione



Raster GRID di output



Le celle sono classificate come visibili o non visibili in funzione della quota del punto di osservazione e di quella delle celle circostanti.

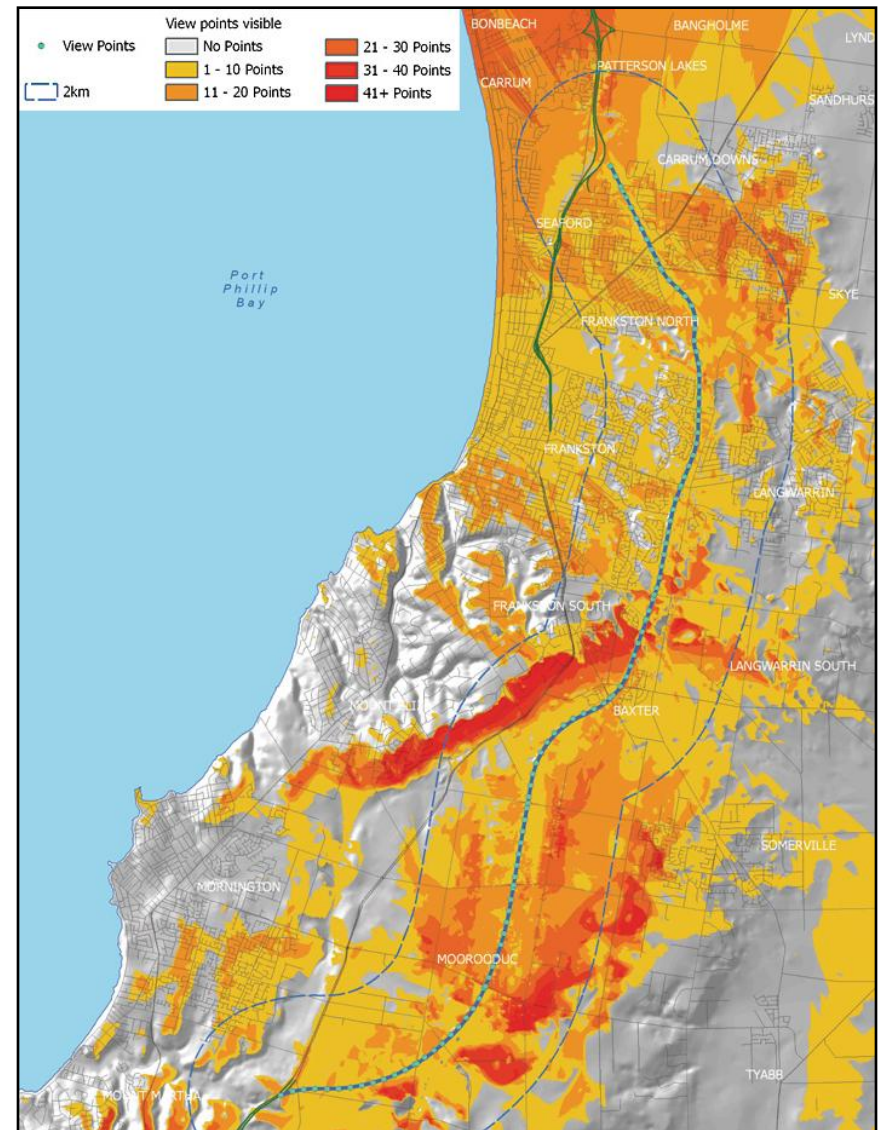


Esempio di calcolo della visibilità per punti di osservazione multipli

In questo caso è stata derivata una mappa di visibilità per stimare l'impatto visivo nella costruzione di una nuova autostrada.

I punti di osservazione sono costituiti dai vertici della linea vettoriale che modella l'autostrada.

Per ogni cella del raster di output è stato calcolato il numero di punti di osservazione visibili da quella cella e quindi, indirettamente, quali porzioni dell'autostrada stessa siano visibili dal territorio circostante.

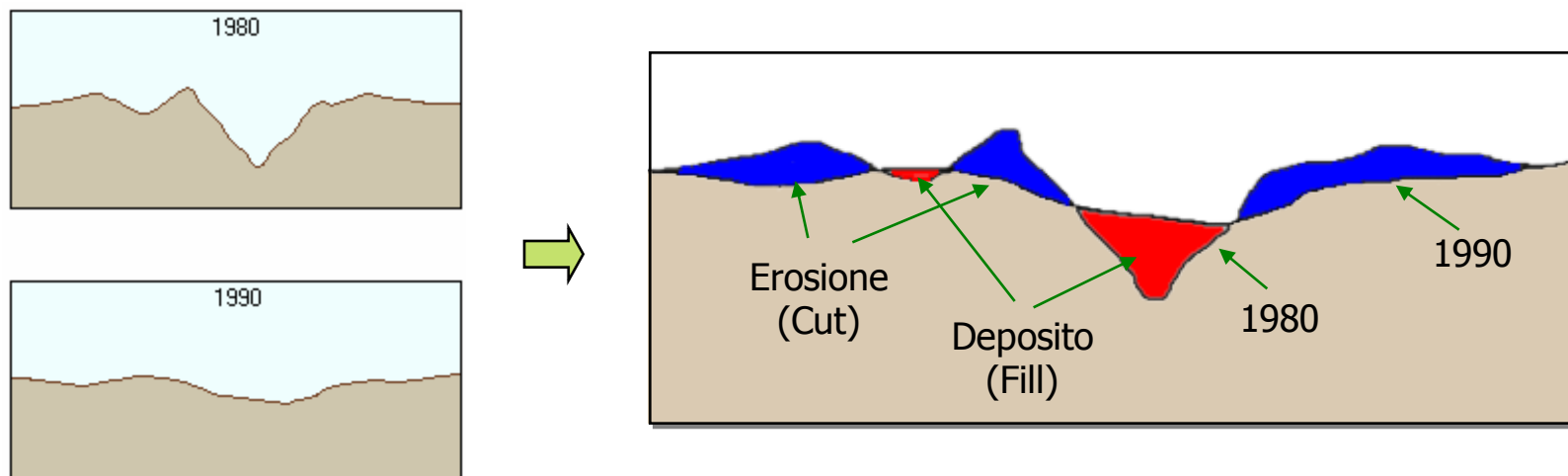


Calcolo di variazioni di volume - Cut & Fill

Calcola le aree e i volumi di variazione tra due superfici aventi la stessa estensione spaziale ma che sono state modificate attraverso addizioni o rimozioni di materiale di superficie in due diversi periodi di tempo.

Il risultato produce un **raster GRID classificato** secondo tre valori:

- superficie non modificata,
- superficie minore per erosione (*cut*),
- superficie maggiore per deposito (*fill*).



I prodotti derivabili da un DTM in formato raster o TIN sono riassunti nella seguente tabella:

Prodotto derivato	Modello di input	Modello di output
Curve di livello	TIN / GRID*	Vettoriale
Carta delle pendenze	TIN / GRID	Raster GRID
Carta delle esposizioni	TIN / GRID	Raster GRID
Carta dell'ombreggiatura	TIN / GRID	Raster GRID
Carta della visibilità	TIN / GRID	Raster GRID
Cut & Fill	TIN / GRID*	Raster GRID

* Per questo prodotto è preferibile utilizzare il TIN come modello dati di input in quanto consente di rappresentare l'andamento della superficie del terreno con maggiore accuratezza rispetto al GRID.

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 di 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 ambientale e paesaggistico di nuove infrastrutture).