

- ▶ **Modelli digitali del terreno:  
DEM, DSM e DTM**
  
- ▶ **Prodotti derivabili da un DTM:**
  - **raster delle pendenze**
  - **raster dell'esposizione**
  - **raster dell'ombreggiatura**
  - **raster della visibilità**
  - **calcolo di volumi**

# Modelli Digitali del Terreno

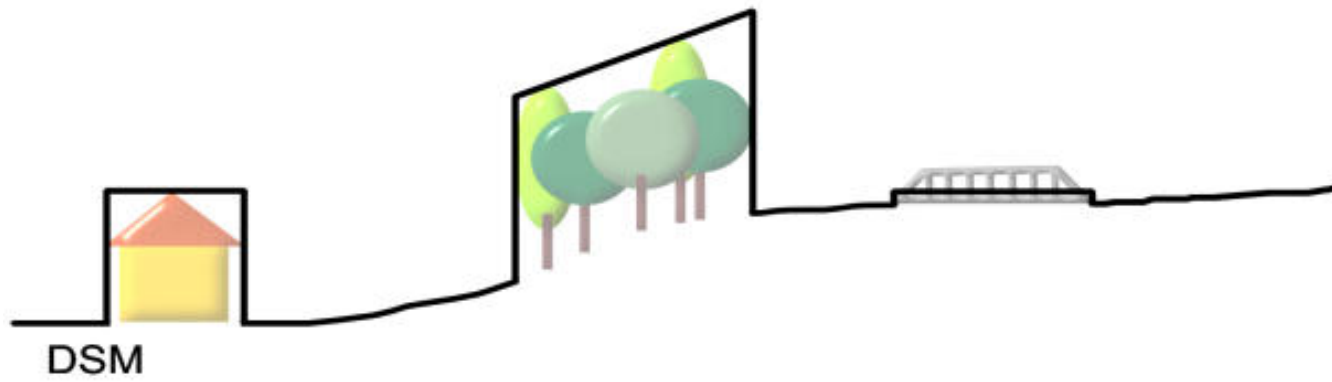
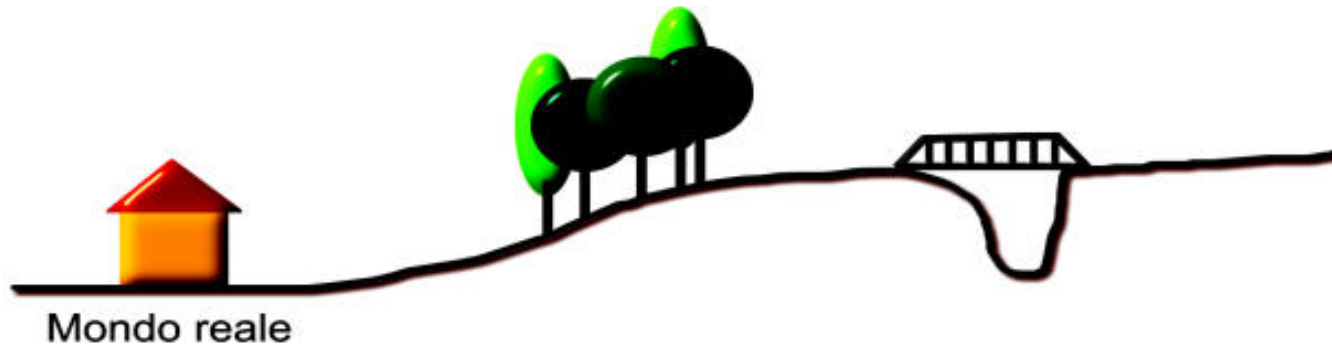
Un particolare tipo di applicazione dei modelli Raster GRID e TIN riguarda la creazione di

- modelli digitali dell'elevazione (**DEM**, *Digital Elevation Model*),
- modelli digitali della superficie del terreno (**DSM**, *Digital Surface Model*)
- modelli digitali del terreno (**DTM**, *Digital Terrain Model*).

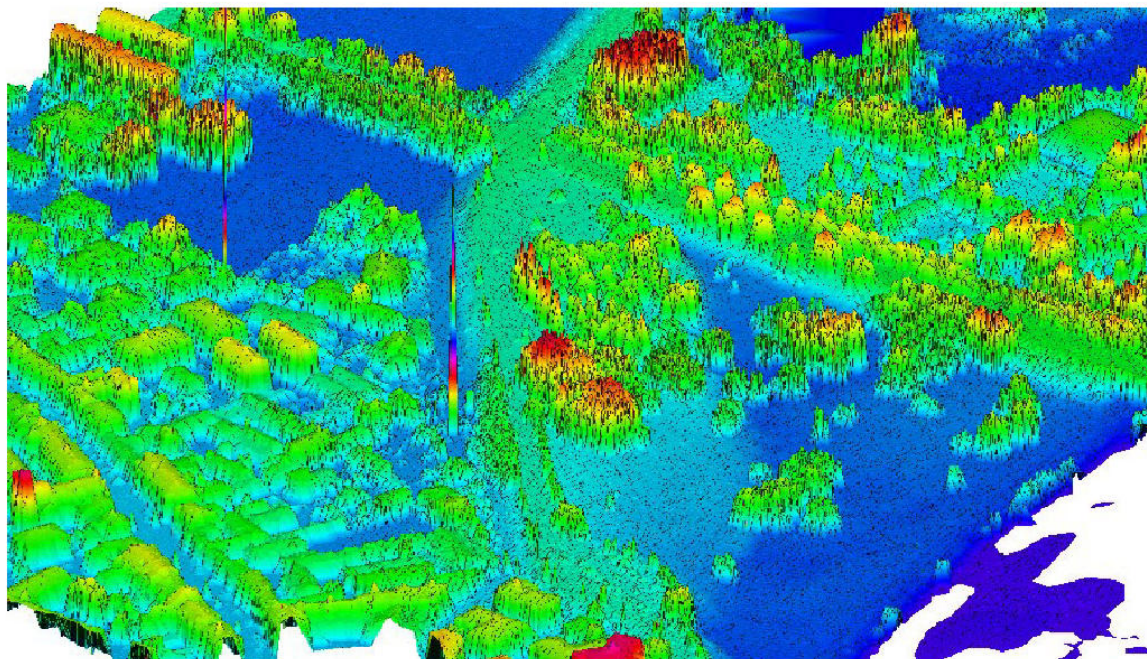
Si tratta di modelli che descrivono la continuità della superficie terrestre attraverso una quantità finita di punti memorizzati sottoforma di triplette di coordinate (X, Y, Z).

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

# Confronto tra DSM e DTM - 1



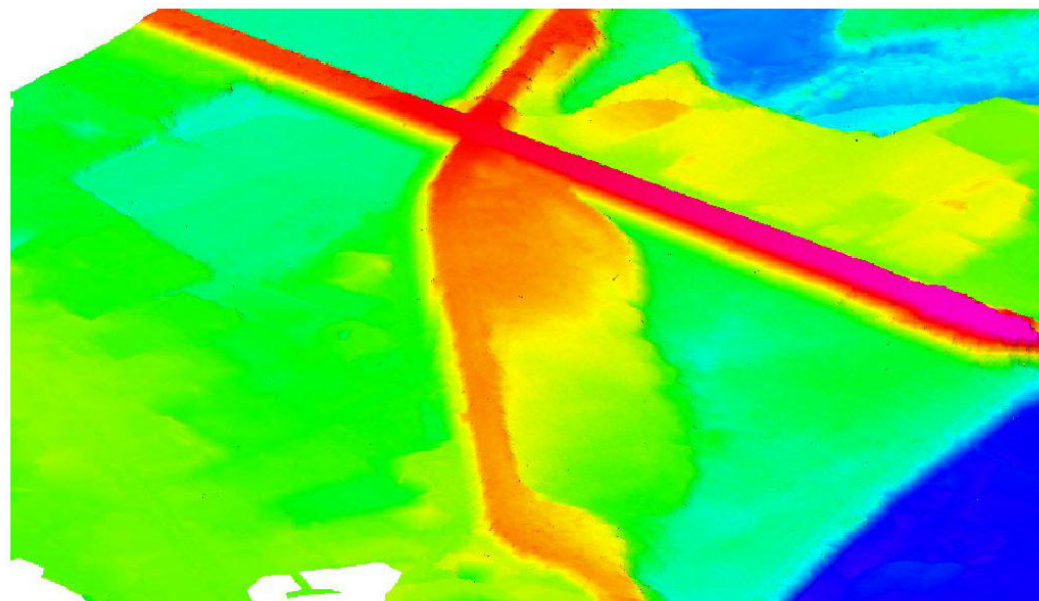
## Confronto tra DSM e DTM - 2



**DSM** generato da dati acquisiti con laser scanner aereo (ALS, *Airborne Laser Scanning*).

**DTM** ottenuto dal DSM filtrando gli elementi antropici e gli alberi.

(Colorazione in base alla quota del terreno)



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

L'analisi di acclività fa parte delle funzioni di **analisi digitale del terreno**.

Questo tipo di analisi comprende un insieme di tecniche utili a **descrivere quantitativamente** (cioè in forma numerica) **la morfologia del terreno**.

D'altra parte il terreno è assimilabile ad una superficie che varia con continuità ma in modo pressochè irregolare.

Come si può allora descrivere **numericamente** la morfologia ?



analisi delle **variazioni locali** dell'elevazione del terreno

essendo queste le caratteristiche che meglio comunicano **come** e **dove** varia la forma del terreno.

In ambito GIS per rappresentare in forma numerica la superficie del terreno si utilizza una relazione matematica del tipo

$$z = f(x, y)$$

In sostanza la superficie terrestre viene descritta tramite una funzione che ad ogni coppia di coordinate di posizione (x, y) associa un valore di elevazione della superficie stessa.

La superficie del terreno, ovvero la **funzione continua**  $z = f(x,y)$ , viene quindi rappresentata attraverso

- una serie di celle (modello raster GRID)
- oppure una serie di triangoli (modello TIN)

a partire da un **numero discreto** di misure dell'elevazione (campioni costituiti da triplette x,y,z).

L'analisi delle variazioni locali dell'elevazione del terreno si basa sul calcolo delle **derivate prima e seconda** della superficie  $z = f(x,y)$ .

Ad esempio la pendenza massima del terreno e l'esposizione si basano sul calcolo della derivata prima dell'elevazione.

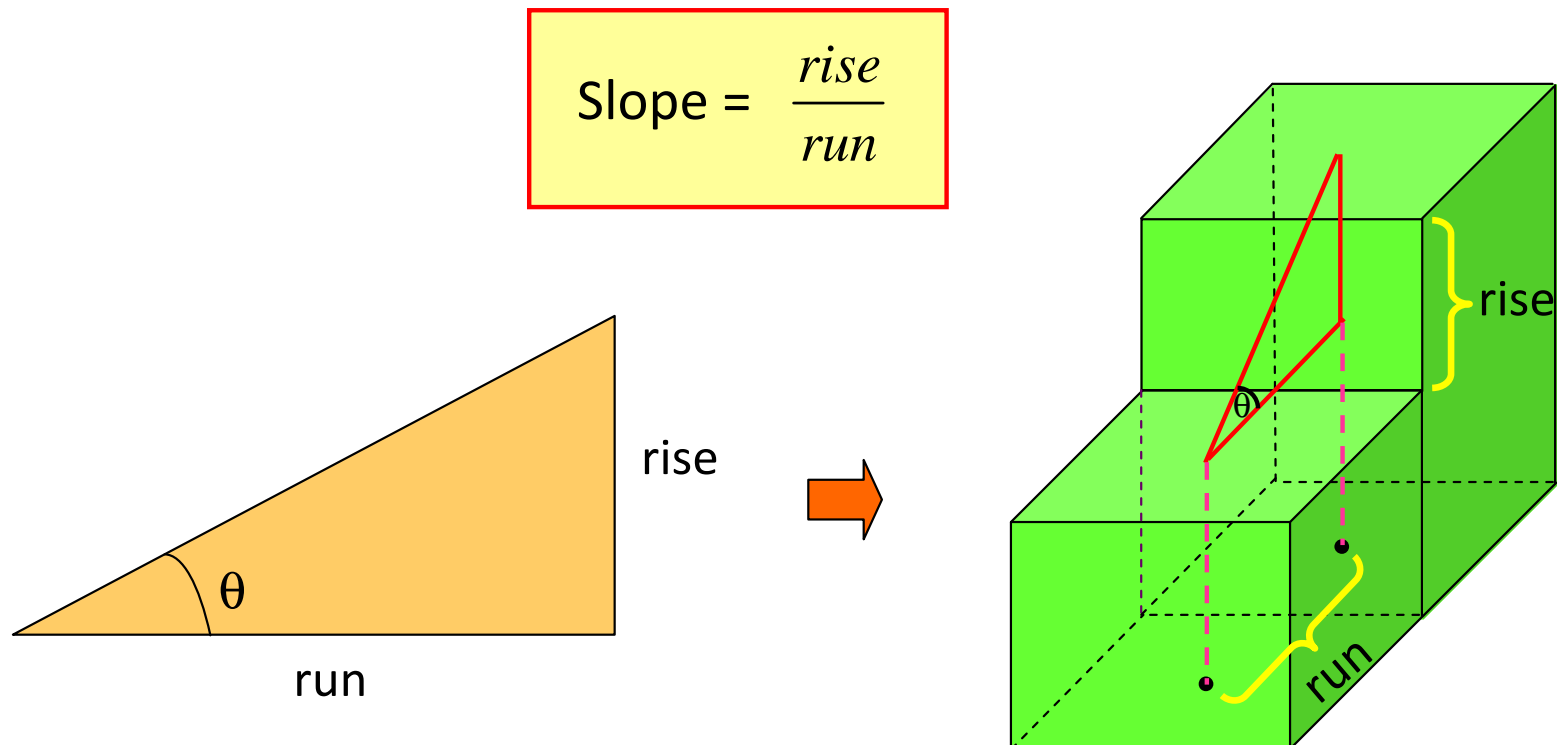
Il parametro acclività rappresenta un elemento geometrico molto importante in quanto influisce

- sulla stabilità dei versanti, determinando un aumento della frequenza di instabilità all'aumentare della pendenza,
- sul comportamento delle acque in termini di dinamica erosiva,
- sul clima, dato che la quantità di energia solare che arriva in superficie dipende dall'inclinazione di quest'ultima.



Nei software GIS il calcolo della pendenza di un terreno viene effettuata sulla base di una struttura dati **raster GRID** le cui celle contengono l'informazione altimetrica (la quota del terreno).

Per ogni cella la pendenza viene calcolata come rapporto tra la differenza di quota (*rise*) tra la cella immediatamente vicina e quella corrente e la distanza (*run*) tra i centri delle due celle.

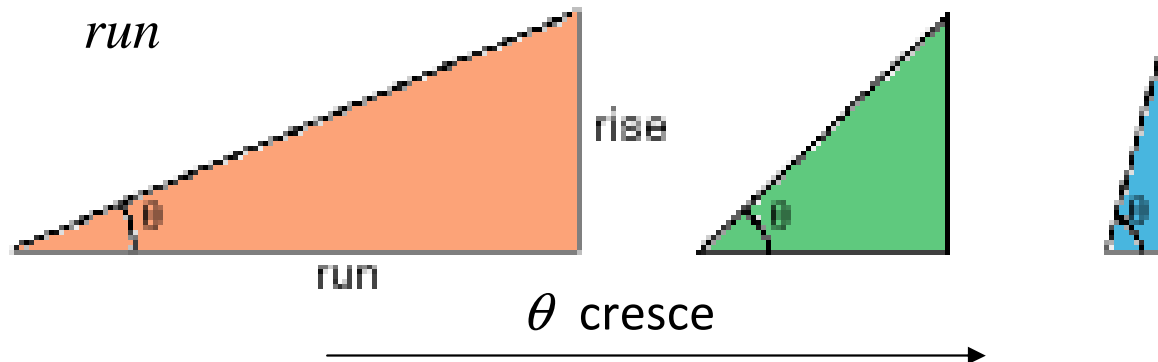


La pendenza può essere espressa in **gradi** o in **percentuale**.

Degree of slope =  $\theta$

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

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



Degree of slope = **30**

**45**

**76**

Percent of slope = **58**

**100**

**375**

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

Dal punto di vista matematico la funzione  $z = f(x,y)$ , utilizzata per modellare la superficie del terreno, è una funzione delle **due variabili**  $x$  e  $y$ , le quali rappresentano anche le direzioni dei due assi coordinati del sistema di riferimento geografico (o cartografico).

Ciò comporta che la pendenza possa assumere valori diversi a seconda della **direzione considerata**.

Di conseguenza, per ogni cella, il calcolo della pendenza viene effettuato valutando la variazione di quota tra una cella e le sue **otto adiacenti** (finestra mobile 3x3).

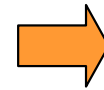
Dell'insieme di valori di pendenza così calcolati, alla cella viene assegnato uno dei seguenti parametri statistici (valore assoluto):

- il massimo
- la media
- la mediana

## Esempio di calcolo delle pendenze - 1



dimensione celle: 10 x 10 m



### Pendenze individuali

$$N = [(29 - 28) / 10] * 100 = 10\%$$

$$NE = [(30 - 28) / 14] * 100 = 14\%$$

$$E = [(31 - 28) / 10] * 100 = 30\%$$

$$SE = [(29 - 28) / 14] * 100 = 7\%$$

$$S = [(27 - 28) / 10] * 100 = -10\%$$

$$SW = [(25 - 28) / 14] * 100 = -21\%$$

$$W = [(27 - 28) / 10] * 100 = -10\%$$

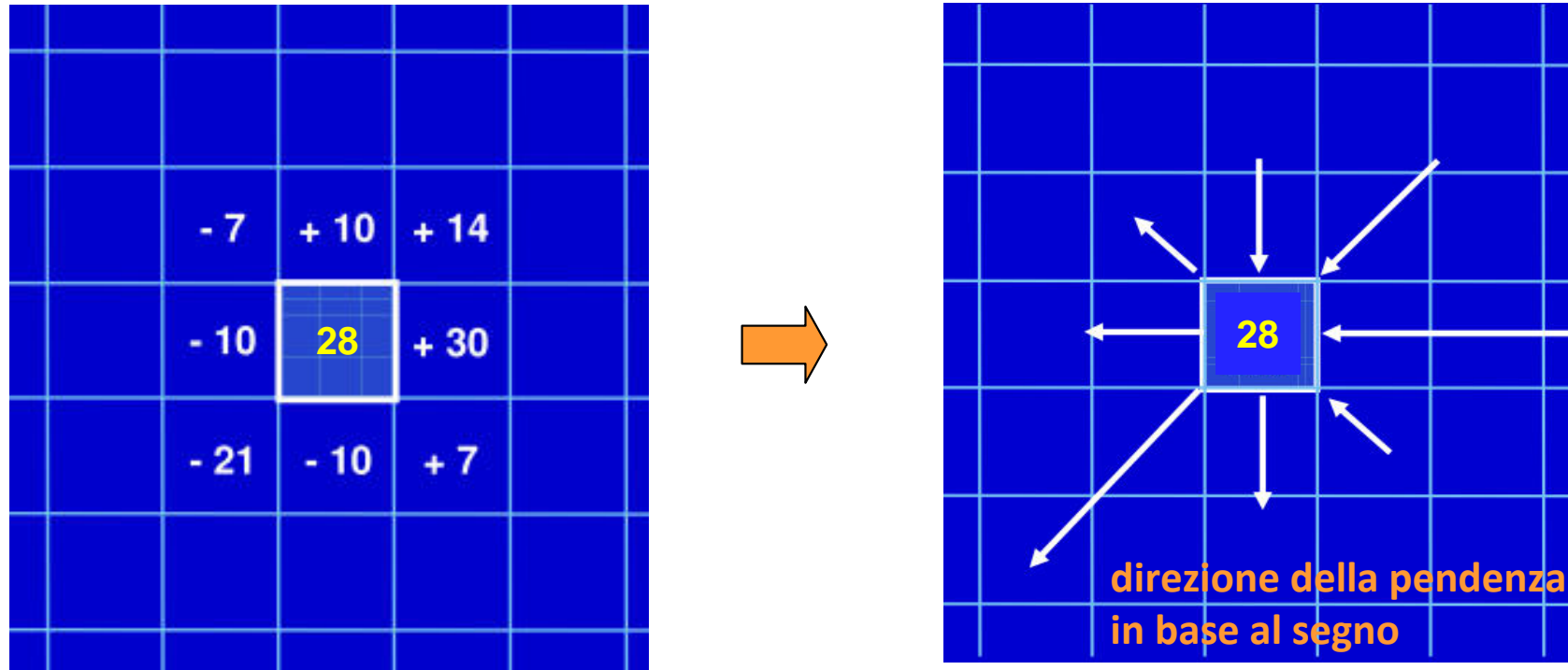
$$NW = [(27 - 28) / 14] * 100 = -7\%$$

Massimo = 30 %    Mediana = 10%    Media = 13%



La distanza tra i centri di due celle adiacenti è diversa a seconda della direzione considerata !

## Esempio di calcolo delle pendenze - 2

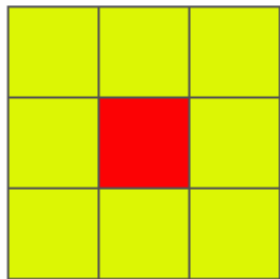




$$\text{Slope} = (\text{rise} / \text{run}) \cdot 100$$

Il segno della pendenza indica la **direzione del flusso superficiale**:

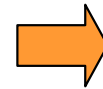
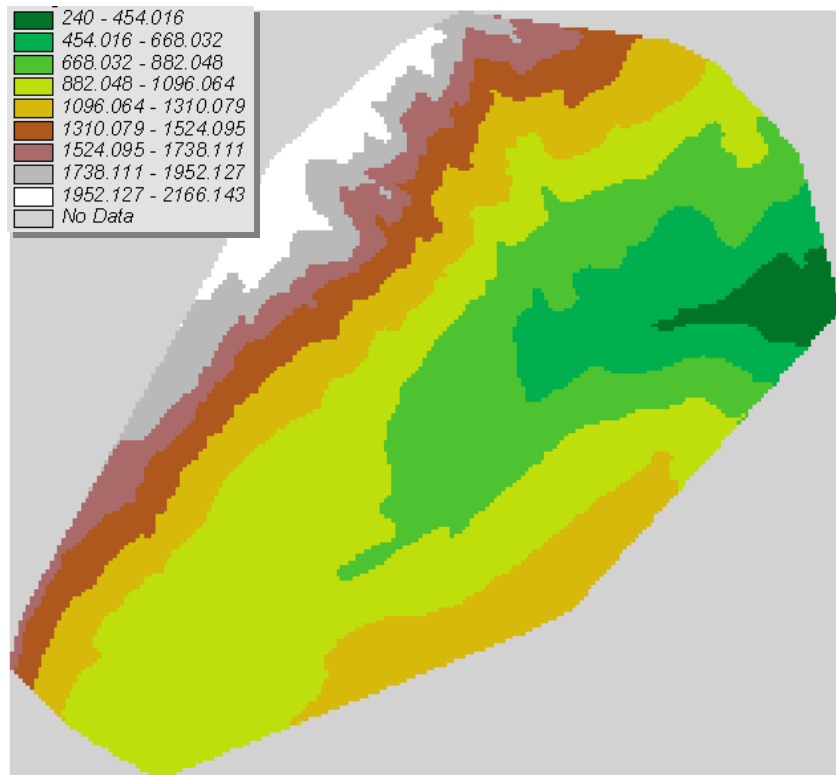
- positivo  $\Rightarrow$  flussi entranti nella cella
- negativo  $\Rightarrow$  flussi uscenti dalla cella

# Esempio di Raster delle pendenze

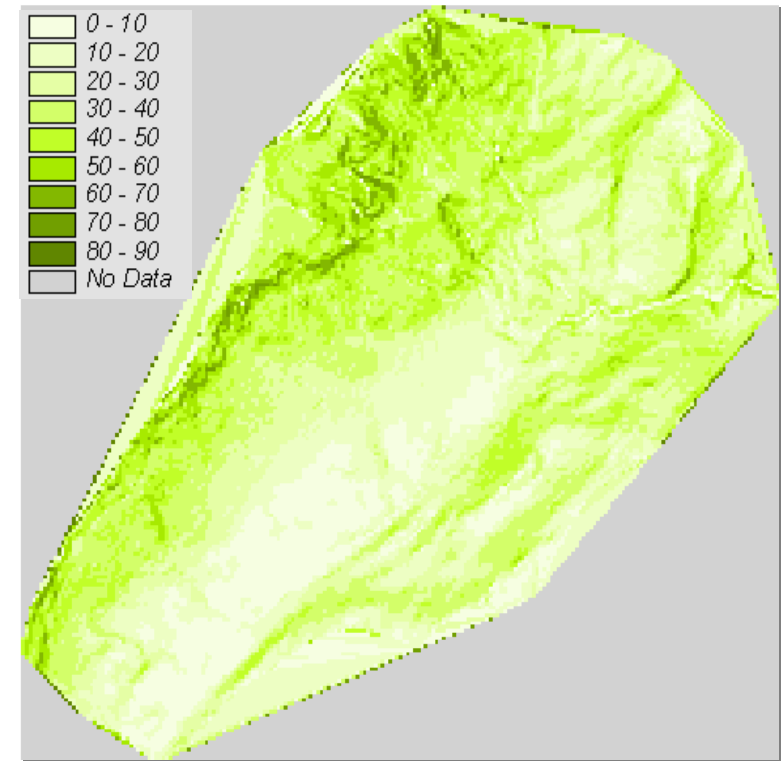


-  Celle adiacenti
-  Cella di calcolo

raster delle elevazioni



valori (massimi) di pendenza in %

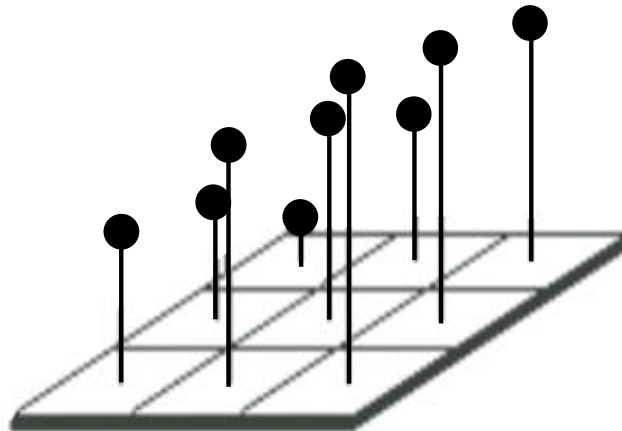


## Metodo di calcolo alternativo: *plane fitting*

Un metodo alternativo per il calcolo della massima pendenza di una cella si basa sul calcolo del piano di “miglior adattamento” (*best-fitted plane*).

Dato un raster GRID, si immagini che i centri delle celle diventino dei **palloncini** (“*floating points*”) ciascuno dei quali si innalzi nell’aria fino ad un’altezza pari all’elevazione della cella corrispondente.

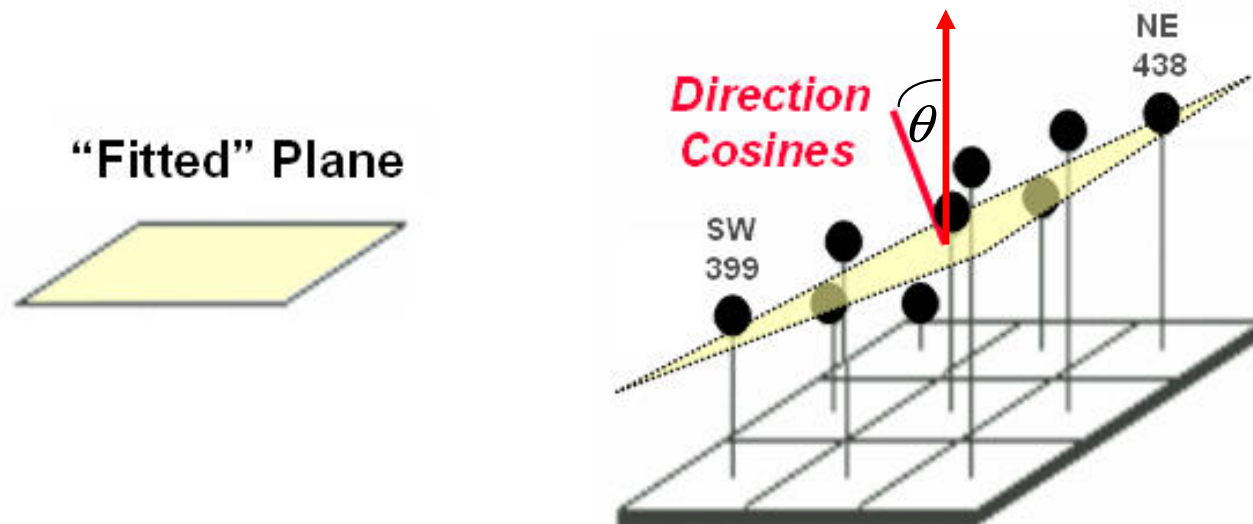
Si consideri quindi una finestra mobile 3x3 centrata su una data cella.



Si inserisca ora tra i palloncini che ricadono in tale finestra un piano e lo si orienti nello spazio in modo da minimizzare le distanze tra esso ed i palloncini.

Ciò che si ottiene è il piano che meglio si adatta alla distribuzione delle elevazioni contenute nella finestra mobile 3x3 considerata (*best fitted plane*).

L'**angolo** tra la normale a tale piano e la direzione della verticale rappresenta il valore di pendenza cercato.





## 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 (massima) pendenza**.

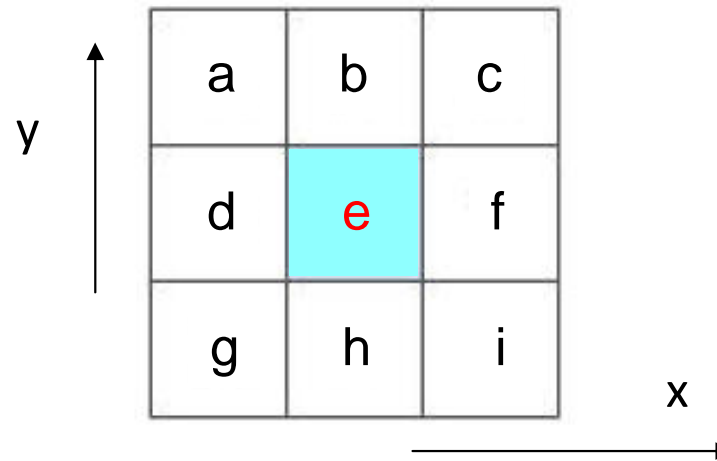
Non ha significato per le superfici parallele al piano orizzontale (Flat).

Si misura in **gradi** rispetto alla direzione del **Nord geografico** ( $0^\circ \div 360^\circ$ ).

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

## Procedura di calcolo delle esposizioni

Una finestra mobile 3x3 “visita” ogni cella del raster di input e per ogni cella al centro della finestra viene calcolata l’esposizione tramite un algoritmo che incorpora i valori delle 8 celle adiacenti.



Derivata prima nella direzione x:

$$[dz/dx] = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / 8$$

Derivata prima nella direzione y:

$$[dz/dy] = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c)) / 8$$

Considerando quindi le due derivate insieme, l'esposizione è calcolata con la seguente formula:

$$\text{aspect} = 57.29578 * \text{atan2}([\text{dz}/\text{dy}], -[\text{dz}/\text{dx}])$$

La costante 57.29578 ( $180/\pi$ ) è il fattore di conversione da radianti a gradi.

Il valore dell'esposizione è poi convertito in angoli di direzione rispetto al **Nord geografico** ( $0^\circ - 360^\circ$ ) in base alla seguente regola:

```
if aspect < 0
    cell = 90.0 - aspect
else if aspect > 90.0
    cell = 360.0 - aspect + 90.0
else
    cell = 90.0 - aspect
```

## Esempio di calcolo delle esposizioni

101	92	85
101	92	85
101	91	84

$$\begin{aligned} [dz/dx] &= ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / 8 \\ &= ((85 + 170 + 84) - (101 + 202 + 101)) / 8 \\ &= -8.125 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [dz/dy] &= ((g + 2h + i) - (a + 2b + c)) / 8 \\ &= ((101 + 182 + 84) - (101 + 184 + 85)) / 8 \\ &= -0.375 \end{aligned}$$

Alla cella centrale della finestra 3x3 compete quindi il seguente valore di esposizione:

$$\begin{aligned} \text{aspect} &= 57.29578 * \text{atan2}([dz/dy], -[dz/dx]) \\ &= 57.29578 * \text{atan2}(-0.375, 8.125) \\ &= -2.64 \end{aligned}$$

Poiché il valore di esposizione calcolato è negativo, per convertire tale valore in angolo di direzione rispetto al Nord geografico va applicata la seguente regola:

$$\begin{aligned} \text{Cell} &= 90.0 - \text{aspect} \\ &= 90 - (-2.64) \\ &= 90 + 2.64 \\ &= 92.64 \end{aligned}$$

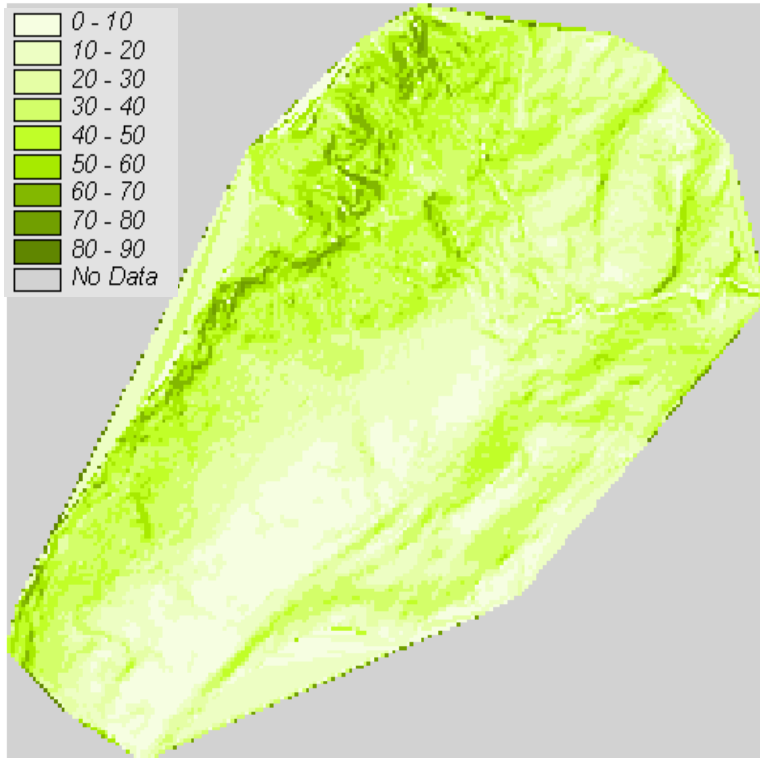
108	87	71
91	92	96
72	96	114

Aspect of elevation

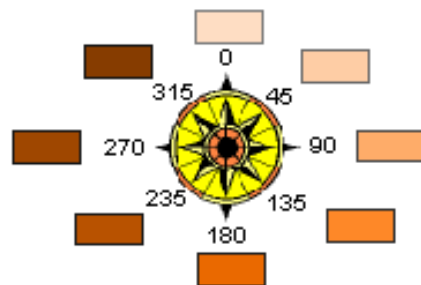
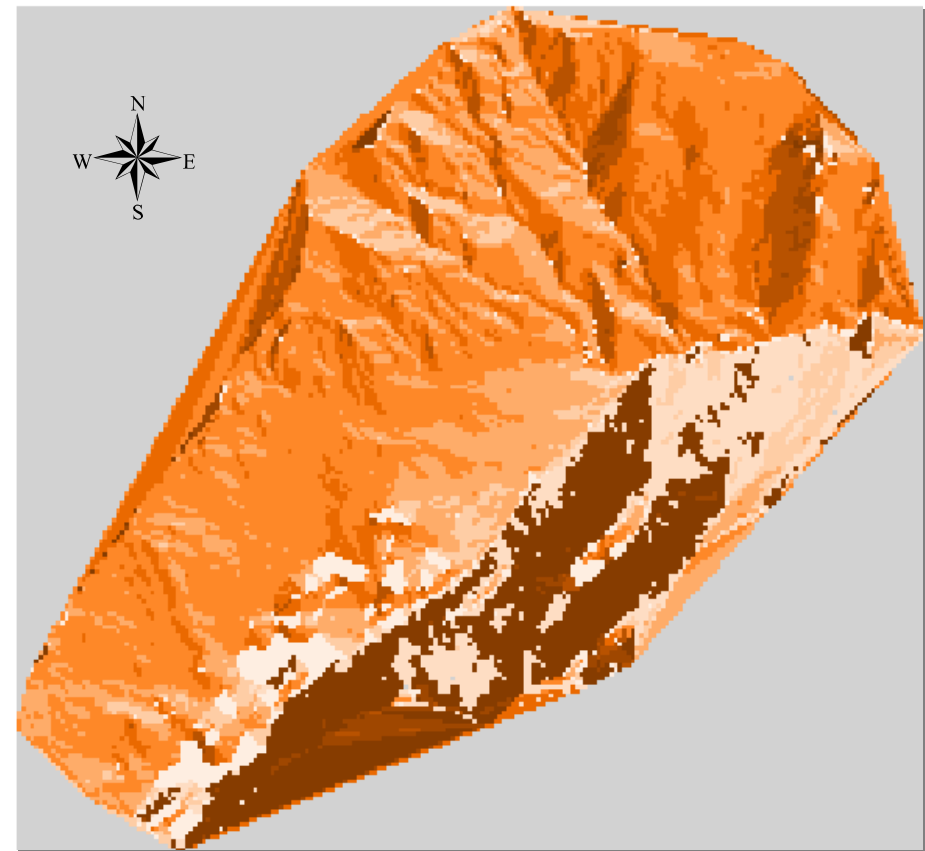
- Flat (-1)
- North (0-22.5)
- Northeast (22.5-67.5)
- East (67.5-112.5)
- Southeast (112.5-157.5)
- South (157.5-202.5)
- Southwest (202.5-247.5)
- West(247.5-292.5)
- Northwest (292.5-337.5)
- North (337.5-360)

# Esempio di Raster delle pendenze

valori (massimi) di pendenza in %



raster delle esposizioni



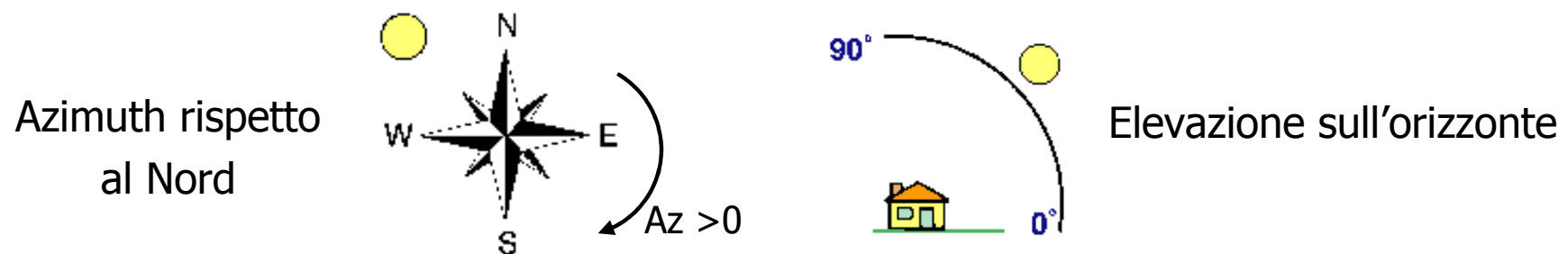
Flat  
No Data

## 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.

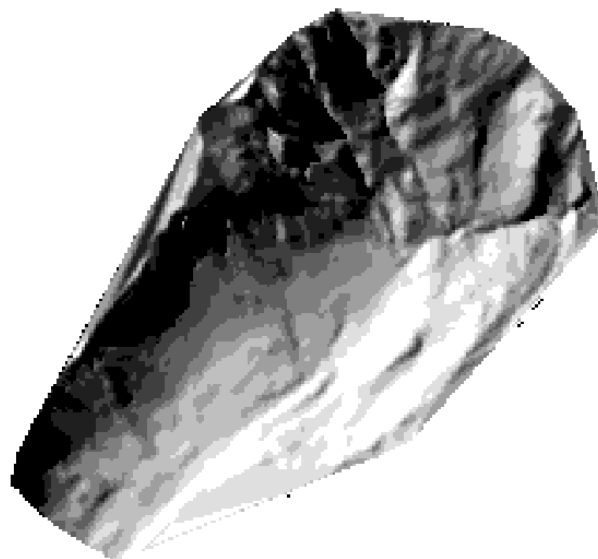


Questo tipo di modello raster può poi essere utilizzato per dare una ombreggiatura al raster sorgente e produrre nell'osservatore l'impressione del rilievo del terreno.

Azimuth: 200° Elevazione: 30°



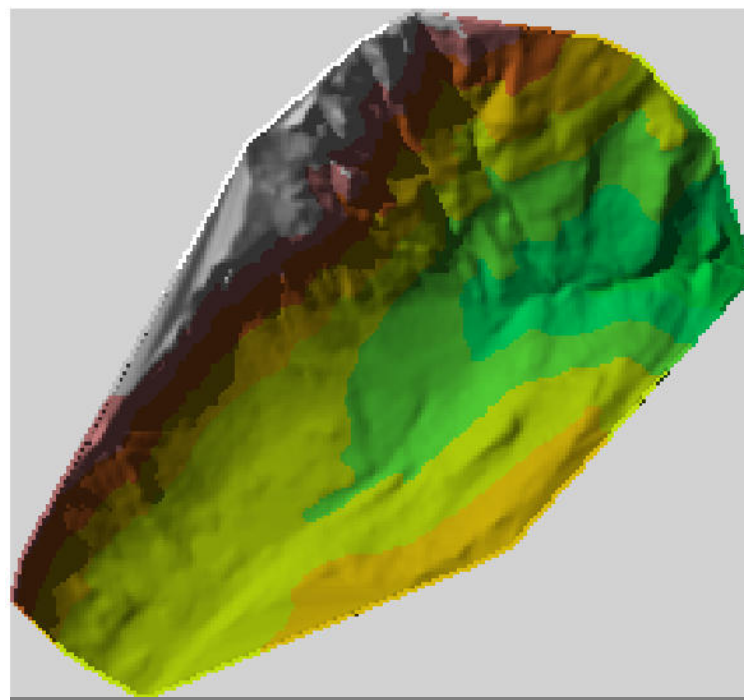
Azimuth: 300° Elevazione: 45°



Azimuth: 100° Elevazione: 45°



Raster sorgente + Hillshade





## Raster della visibilità - Viewshed

---

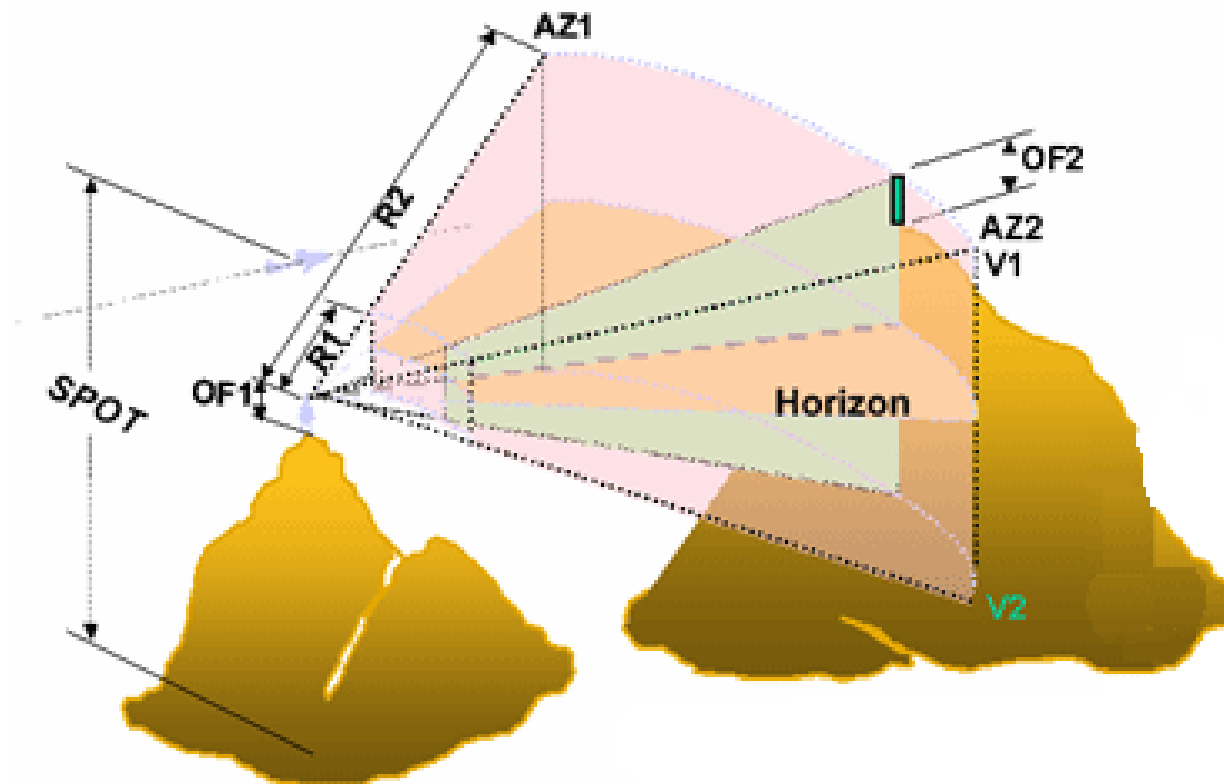
Una **viewshed** identifica le celle di una copertura raster che possono essere viste da uno (o più) punti di osservazione.

Si distinguono due diversi tipi di analisi di visibilità:

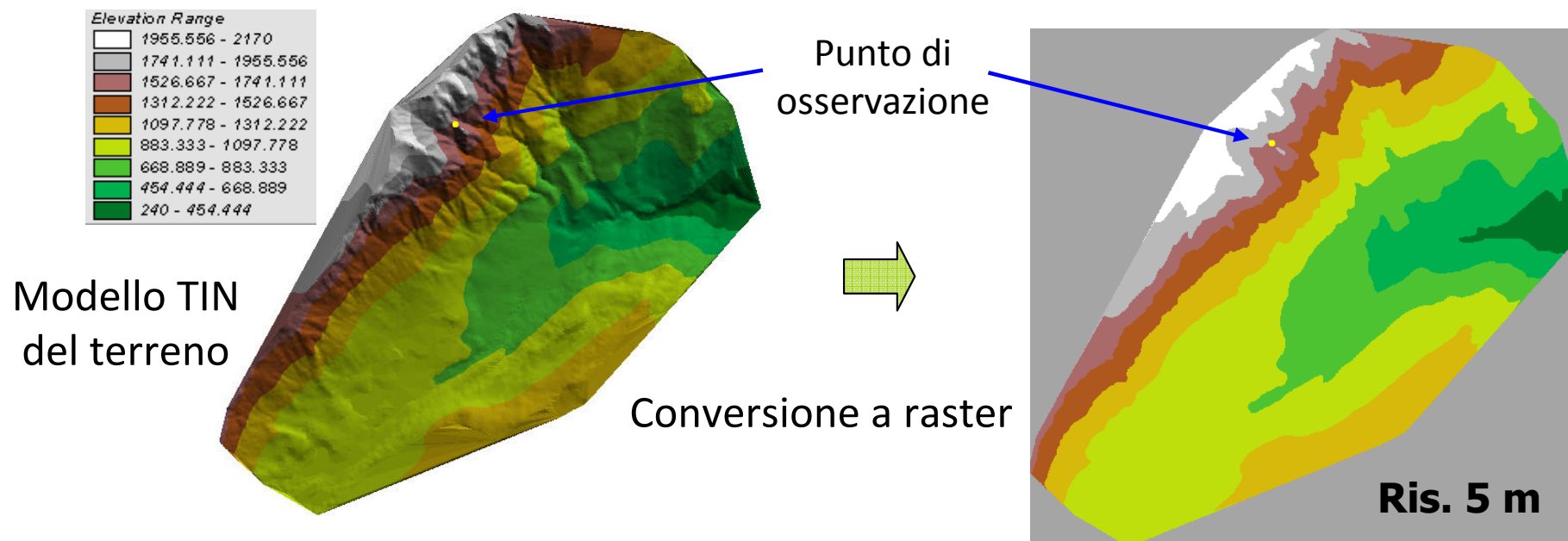
- a) singolo punto di osservazione** (es. punto panoramico, torre di avvistamento, ecc.) → si determinano le celle che possono essere viste da quel punto (a queste viene attribuito il valore 1, alle altre celle che non possono essere viste da quel punto viene attribuito il valore 0);
- b) più punti di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

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

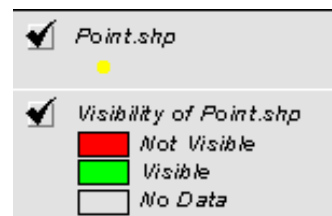
- Offset verticale dell'osservatore rispetto al terreno (OF1);
- Offset verticale di ogni cella considerata per la visibilità (OF2);
- Campo di vista orizzontale dell'osservatore (angoli AZ1 e AZ2);
- Campo di vista verticale dell'osservatore (angoli V1 e V2);
- Distanza minima (R1) e massima (R2) entro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



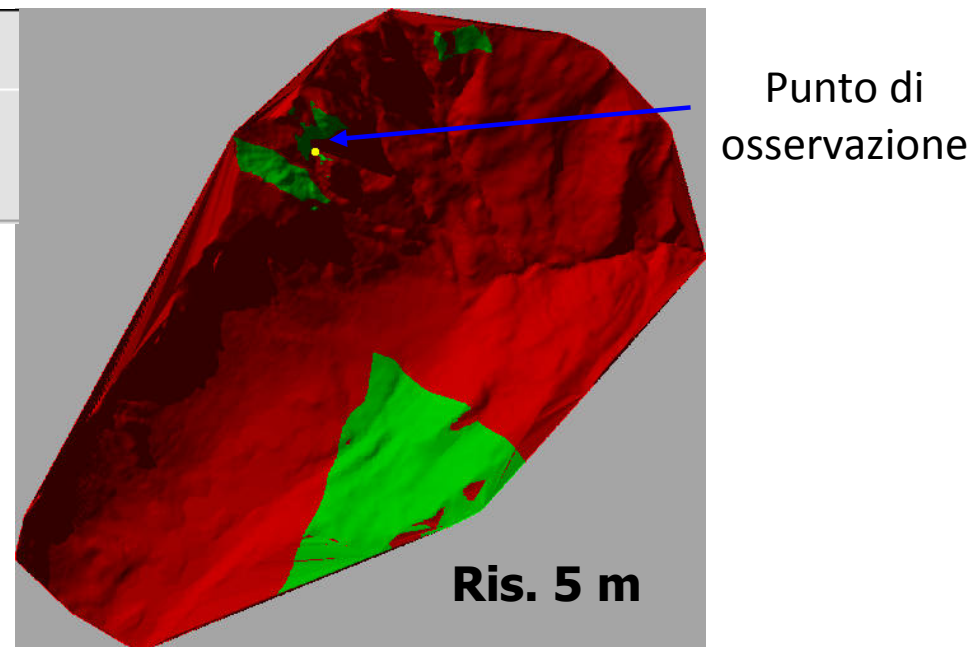
# Esempio di calcolo della visibilità per singolo punto di osservazione



Raster GRID di output



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

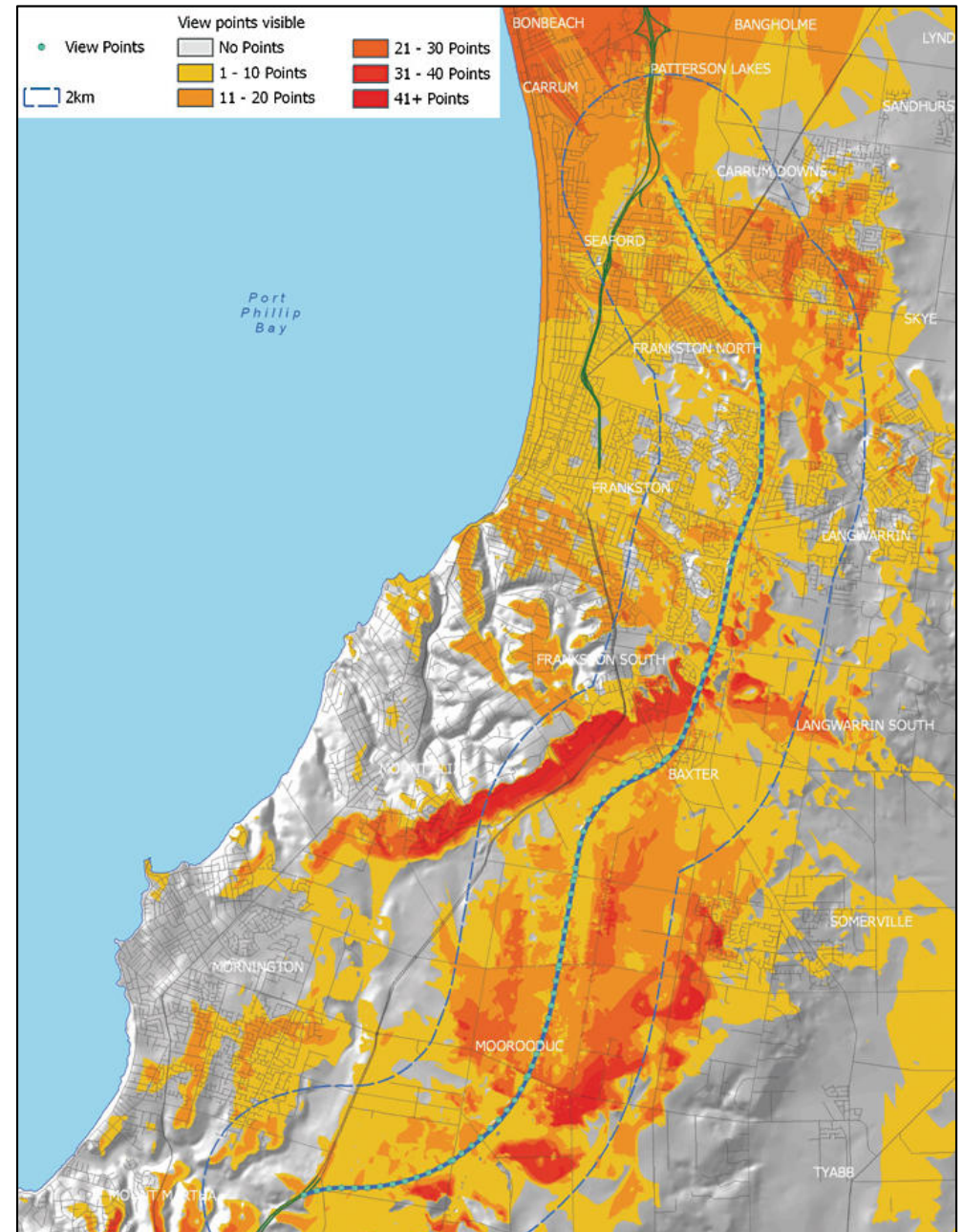


# Esempio di calcolo della visibilità per punti di osservazione multipli

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.

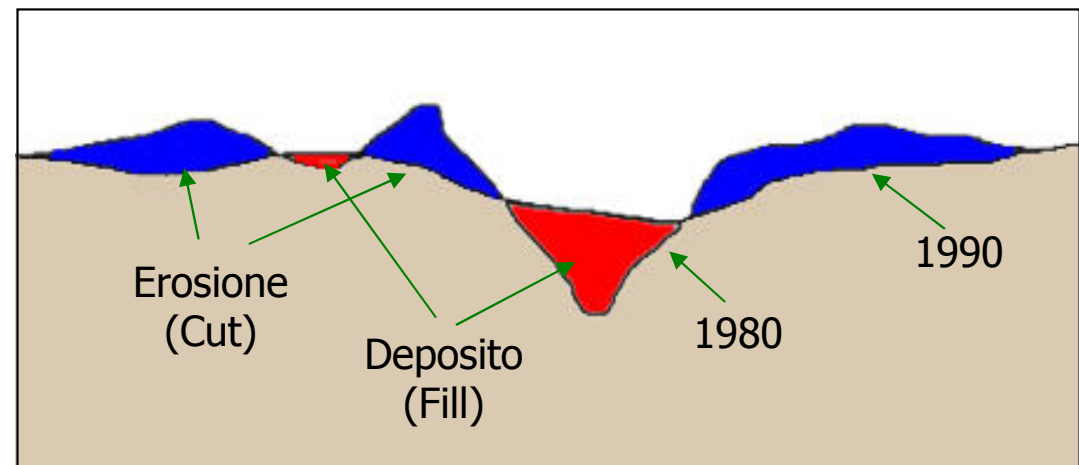
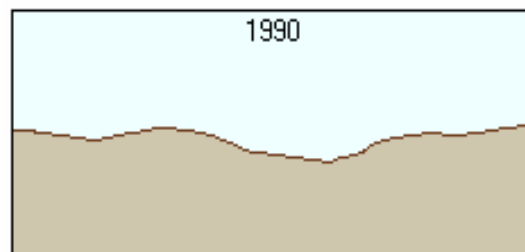
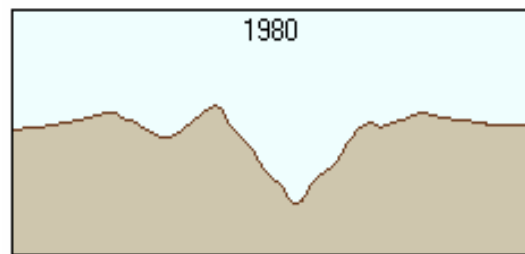


## Calcolo di variazioni di volume - Cut & Fill

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:

- cella non modificata
- cella modificata per erosione (*cut*)
- cella modificata per deposito (*fill*)



Il volume associato a ciascuna cella è calcolato tramite la semplice formula del **volume di un parallelepipedo**:

$$\text{Volume} = (\text{area cella}) * \Delta Z = d^2 * \Delta Z$$

con

$d$  = dimensione cella (quadrata)

$$\Delta Z = Z_{\text{epoca1}} - Z_{\text{epoca2}}$$

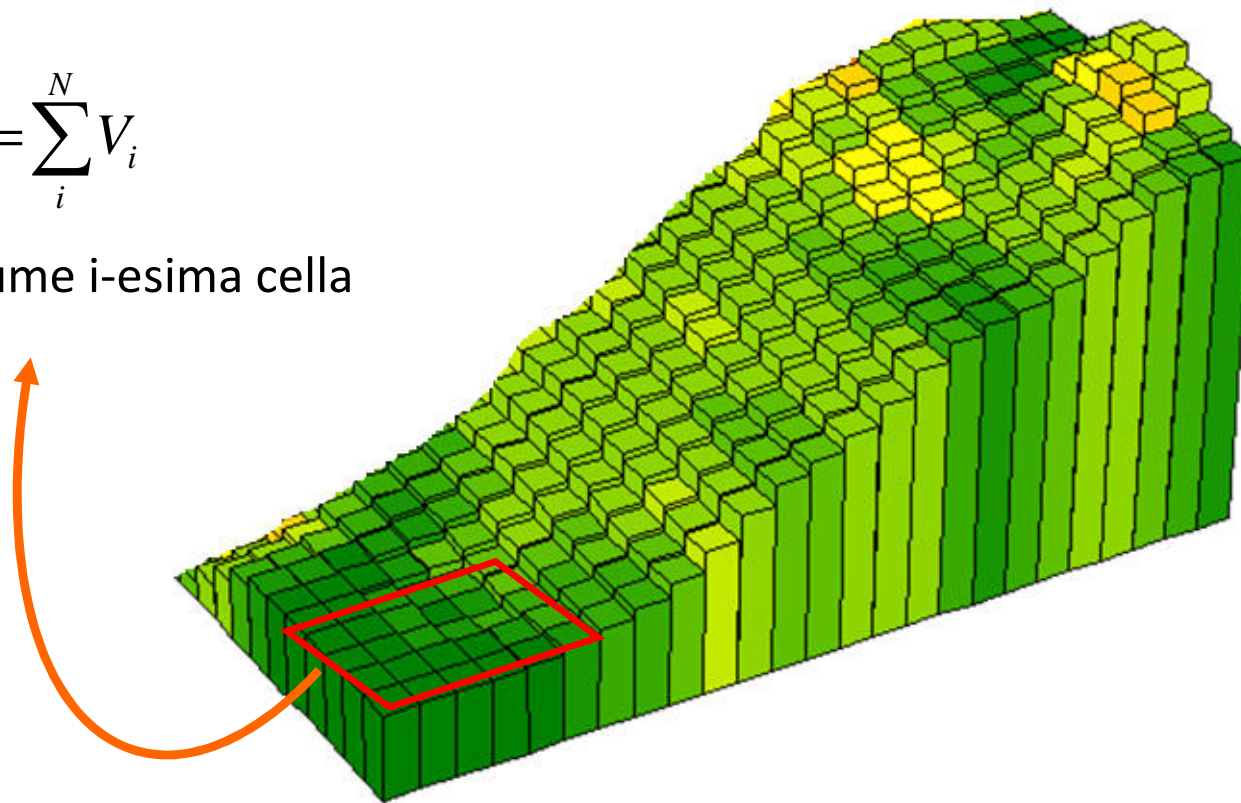
In base alla convenzione adottata per il calcolo della differenza di quota  $\Delta Z$ , dalla formula precedente si ricava che nelle celle dove il materiale

- è stato asportato (**erosione**)  $\Rightarrow$  volume **positivo**
- è stato aggiunto (**deposito**)  $\Rightarrow$  volume **negativo**

Per una porzione di terreno (gruppo di celle del raster) interessata da un fenomeno di erosione (o deposito), il volume di materiale asportato (o depositato) sarà quindi dato dalla **somma dei volumi dei parallelepipedi** associati al gruppo di celle corrispondente.

$$Vol_{totale} = \sum_i^N V_i$$

$V_i$  = volume i-esima cella



Il valore del volume così calcolato è un'**approssimazione** del valore reale.

L'accuratezza del calcolo dipende principalmente dai seguenti fattori:

- dimensione della cella del raster,
- accuratezza dell'algoritmo di interpolazione dei campioni di misura adottato,
- densità dei campioni di misura originari, utilizzati per la creazione del raster GRID.
- accuratezza delle misure di elevazione dei campioni.



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

<b>Prodotto derivato</b>	<b>Modello di input</b>	<b>Modello di output</b>
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).