

## MINIMI QUADRATI. REGRESSIONE LINEARE

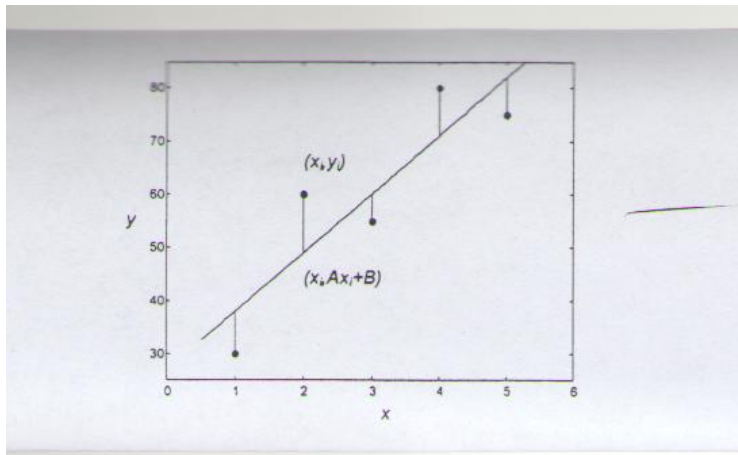
Se il coefficiente di correlazione  $r$  è prossimo a 1 o a -1 e se il diagramma di dispersione suggerisce una relazione di tipo lineare, ha senso determinare **l'equazione di una retta che approssimi “nel modo migliore” i dati.**

Sia dato un insieme di  $n$  punti  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ , si vuole determinare la retta

$$y = Ax + B$$

che meglio “approssima” questi punti.

In questa figura si osserva la retta  $y = Ax + B$  ed i punti  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ . I segmenti in figura hanno lunghezza  $|Ax_i + B - y_i|$  e rappresentano l'errore che si fa a voler rappresentare i dati con una singola retta (e quindi con i soli due parametri  $A$  e  $B$ ).



Se i punti fossero perfettamente allineati, si potrebbe scegliere l'unica retta che passa per tutti i punti e si renderebbe quindi nullo l'errore.

In generale si può quantificare l'errore totale  $E$  che si commette sommando i quadrati delle lunghezze di tutti i segmenti ossia

$$E(A, B) = \sum_{i=1}^n (Ax_i + B - y_i)^2$$

Per ogni possibile scelta della retta, ossia della scelta dei parametri  $A$  e  $B$ , l'errore è differente.

Il criterio che generalmente viene usato per definire il “modo migliore” è detto **metodo dei minimi quadrati** e consiste nel minimizzare la quantità  $E(A, B)$  rispetto ad  $A$  e  $B$ .

**Definizione.** La **retta di regressione lineare** è la retta di equazione

$$y = Ax + B$$

che rende minimo l'errore  $E(A, B)$  dove

$$E(A, B) = \sum_{i=1}^n (Ax_i + B - y_i)^2$$

In altre parole, si devono determinare  $A$  e  $B$  in modo che  $E(A, B)$  sia il minimo possibile.

Si noti che  $E(A, B)$  è una quantità non negativa che può assumere il valore nullo soltanto quando tutti i punti sono perfettamente allineati.

Se i dati sono perfettamente allineati ossia **esattamente** linearmente correlati:

$$y_i = ax_i + b,$$

si avrà:

$$E(A, B) = \sum_{i=1}^n (Ax_i + B - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (Ax_i + B - ax_i + b)^2$$

scegliendo

$$A = a, \quad B = b$$

si ottiene  $E = 0$  che è necessariamente il minimo di  $E$ .

In altre parole, se i dati sono esattamente disposti su una retta, questa **coincide** con la retta di regressione lineare.

In generale, per trovare il minimo di  $E(A, B)$  basta calcolare le due derivate parziali rispetto ad  $A$  e  $B$  e imporre che siano nulle.

Imponendo che la derivata rispetto ad  $A$  sia nulla si ottiene:

$$A \sum_{i=1}^n x_i^2 + B \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i = 0$$

mentre che la derivata rispetto ad  $B$  sia nulla si ottiene:

$$A \sum_{i=1}^n x_i + nB - \sum_{i=1}^n y_i = 0$$

(se lo studente non sa fare le derivate può solo fidarsi).

Usiamo  $\sum_{i=1}^n x_i = n\bar{x}$  e  $\sum_{i=1}^n y_i = n\bar{y}$ ; la seconda equazione diventa

$$An\bar{x} + nB = n\bar{y} \quad \rightarrow \quad B = \bar{y} - A\bar{x}$$

Sostituendo nella prima equazione si ha

$$A \sum_{i=1}^n x_i^2 + (\bar{y} - A\bar{x})n\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad \rightarrow$$
$$\rightarrow \quad A \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}$$

e dividendo ambo i membri per  $n - 1$

$$\rightarrow \quad A \cdot s_x^2 = s_{xy}$$

## STIMATORI DEI MINIMI QUADRATI

Da cui si ottiene:

$$A = \frac{s_{xy}}{s_x^2} = r \frac{s_y}{s_x}$$

dove  $s_{xy}$  = covarianza,  $s_x$  = deviazione standard di  $x$ ,  $s_y$  = deviazione standard di  $y$  e  $r$  = coefficiente di correlazione.  
Abbiamo inoltre già visto che

$$B = \bar{y} - A\bar{x}$$

dove  $\bar{x}$  = media campionaria di  $x$  e  $\bar{y}$  = media campionaria di  $y$ .



## CASO LINEARE

Abbiamo visto che nel caso in cui i punti siano del tutto allineati, ossia  $y_i = ax_i + b$ , si ha  $r = \text{sign}(a)$ , si ha inoltre  $s_y^2 = a^2 s_x^2$  e quindi  $s_y = |a|s_x$ .

In definitiva:

$$A = r \frac{s_y}{s_x} = \text{sign}(a) \cdot |a| = a$$

mentre

$$B = \bar{y} - A\bar{x} = \bar{y} - a\bar{x} = b$$

La retta di regressione è quindi  $\bar{y} = a\bar{x} + b$  ossia la retta che passa per i tutti i dati.

### Esempio (dati non allineati).

Acquisto di un'automobile usata.

<b>Anni (x)</b>	9	12	8	15	6
<b>Costo (y)</b>	18	8	17	7	20

Avevamo già calcolato le medie campionarie

$$\bar{x} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 x_i = \frac{9 + 12 + 8 + 15 + 6}{5} = 10$$

$$\bar{y} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 y_i = \frac{18 + 8 + 17 + 7 + 20}{5} = 14$$

Avevamo già calcolato anche la covarianza

$$\begin{aligned} s_{xy} &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \\ &= \frac{(-1)(4) + (2)(-6) + (-2)(3) + (5)(-7) + (-4)(6)}{4} = \\ &= \frac{-4 - 12 - 6 - 35 - 24}{4} = = -20,25 \end{aligned}$$

Si ricordi che la covarianza è negativa perché i dati sono ordinati in modo approssimativamente decrescente.

Calcoliamo ora

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 =$$
$$= \frac{(-1)^2 + (2)^2 + (-2)^2 + (5)^2 + (-4)^2}{4} = = \mathbf{12,5}$$

e, per completezza, calcoliamo anche

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 =$$
$$= \frac{(4)^2 + (-6)^2 + (3)^2 + (-7)^2 + (6)^2}{4} = = \mathbf{36,5}$$

Abbiamo quindi tutti i dati necessari

$$\bar{x} = 10, \quad \bar{y} = 14, \quad s_{xy} = -20,25$$

ed anche

$$s_x^2 = 12,5, \quad s_x = 3,54, \quad s_y^2 = 36,5, \quad s_y = 6,04$$

E per completezza possiamo anche ricalcolare il coefficiente di correlazione

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} = \frac{-20,25}{3,54 \cdot 6,04} = -0,948$$

La correlazione negativa è molto forte (il coefficiente è prossimo a -1), ha quindi senso interpolare linearmente (cercare la retta di regressione lineare).

Abbiamo quindi

$$A = \frac{s_{xy}}{s_x^2} = \frac{-20,25}{12,5} = -1.62$$

oppure possiamo usare

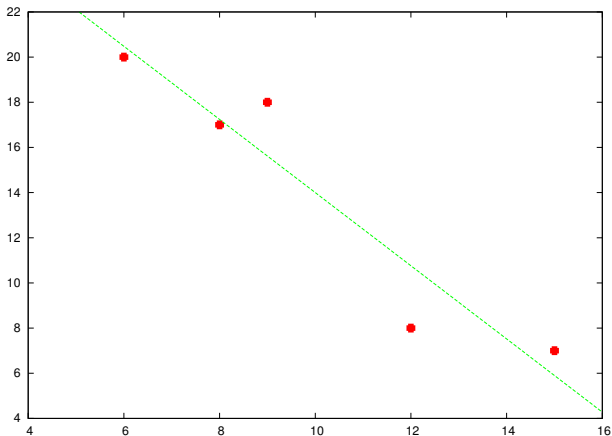
$$A = r \frac{s_y}{s_x} = -0,948 \cdot \frac{3,54}{6,04} = -1.62$$

Il parametro  $B$  è invece

$$B = \bar{y} - A\bar{x} = 14 + 1,62 \cdot 10 = 30,2$$

Quindi la retta di regressione lineare è

$$y = -1.62x + 30,2$$



La retta di regressione lineare è  $y = -1.62x + 30,2$ .

In generale, più  $|r|$  è prossimo al valore 1, più la retta di regressione lineare *rappresenta* in modo corretto i dati.