



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO
DI GEOSCIENZE

Impatto del cambiamento climatico sul bilancio idrogeologico nella pianura ferrarese

Laureando: Andrea Fiorini

Relatore: Prof. Leonardo Piccinini

Anno accademico: 2022/2023

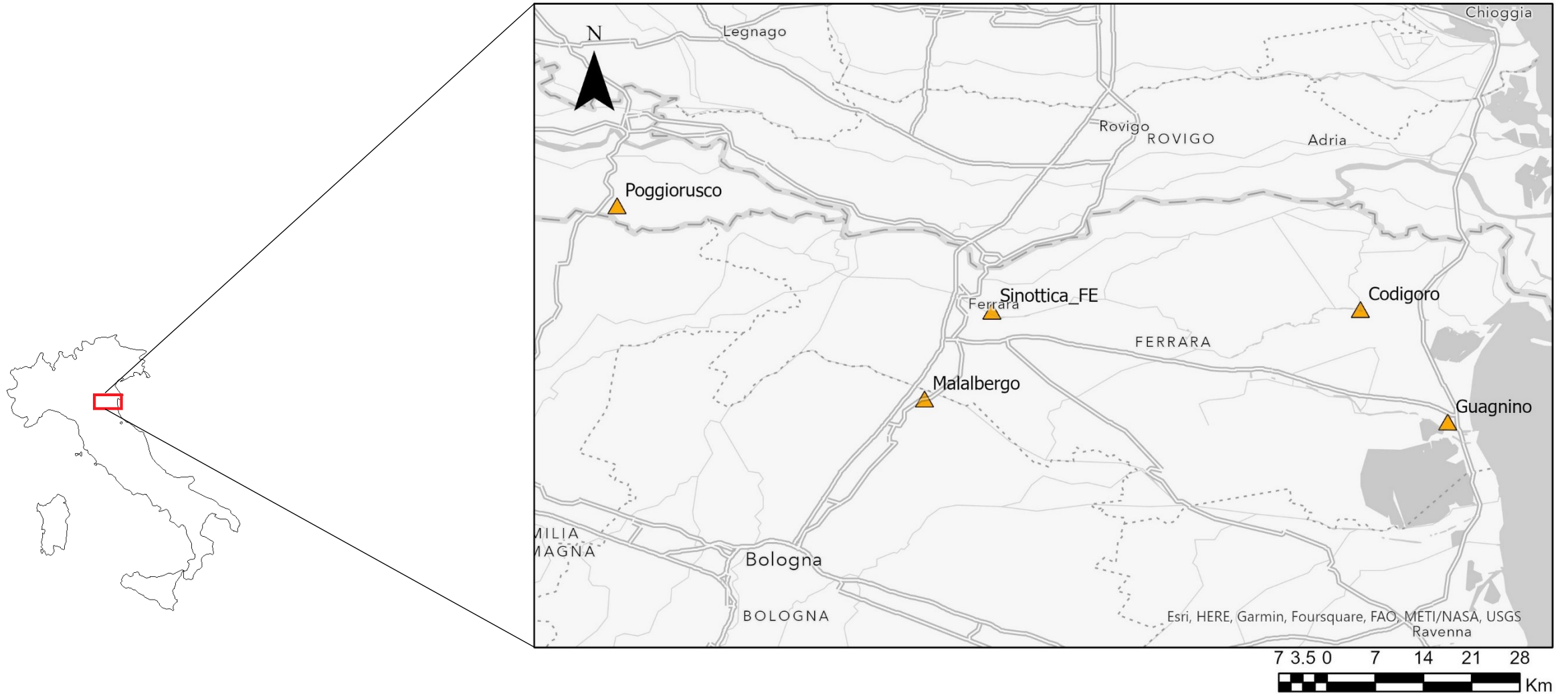
Obiettivi e metodologia

- **Stima** del bilancio idrico del suolo in alcune stazioni metereologiche della Provincia di Ferrara;
- identificazione di eventuali trend climatici nelle serie temporali di precipitazione e temperatura e nei parametri del bilancio.

ATTRAVERSO

- Identificazione delle stazioni metereologiche significative ed acquisizione delle serie storiche dal 1958 al 2022 di precipitazione e temperatura;
- **analisi statistica** esplorativa per la valutazione della qualità delle serie storiche acquisite e del loro grado di interdipendenza;
- omogeneizzazione delle serie temporali attraverso la **ricostruzione dei dati mancanti**;
- stima dell'**autocorrelazione** e realizzazione di **test statistici** per l'individuazione delle eventuali tendenze (Mann-Kendal, Theil-Sen, regressione lineare semplice).

Area di studio



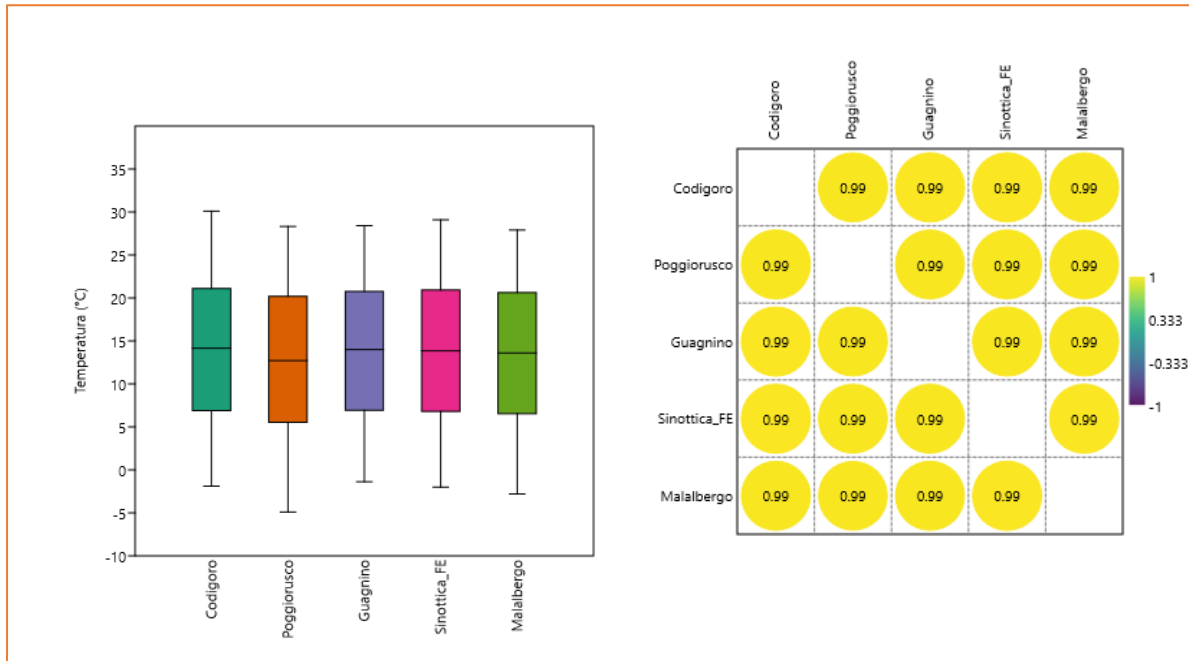
Il portale SCIA



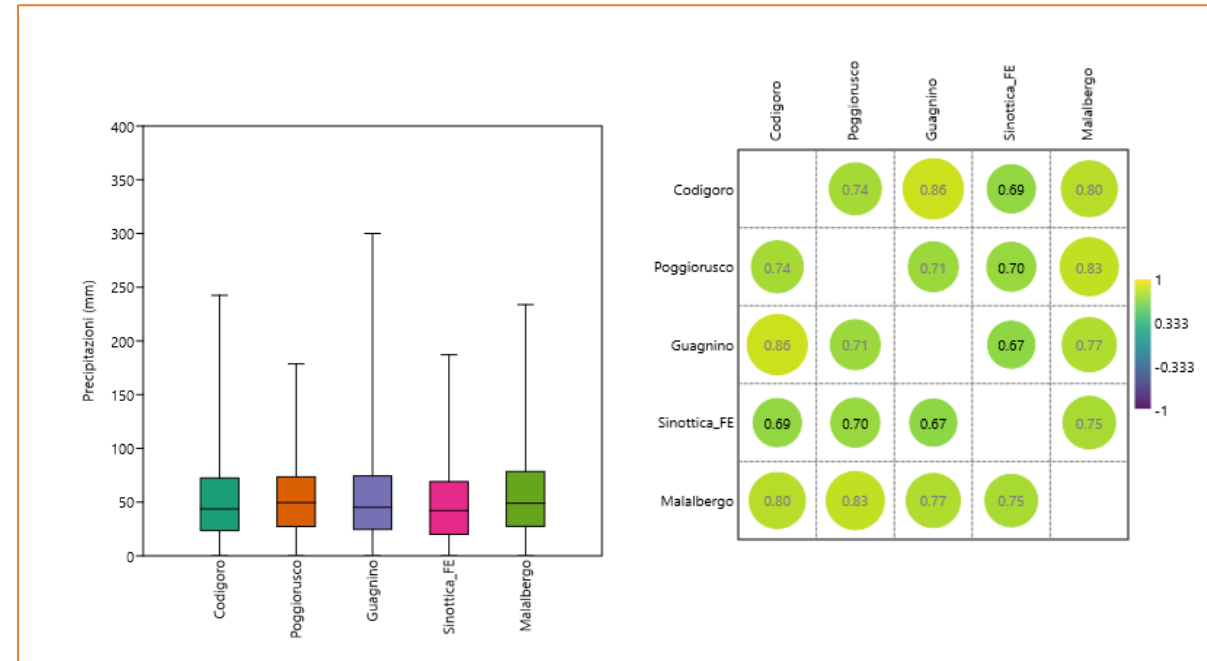
- **SCIA** è il sistema nazionale per la raccolta, elaborazione e diffusione di dati climatici, realizzato dall'ISPRA; in base alle **serie temporali** di osservazioni provenienti da diverse reti di **monitoraggio**, vengono calcolati e rappresentati i **valori statistici** decadali, mensili e annuali delle principali variabili meteorologiche.
- Le serie di dati climatici vengono sottoposte a **controlli di validità** con metodologie omogenee, secondo le linee guida dettate dall'**Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO)**.
- Attraverso il **sito web** è possibile visualizzare sotto forma di **tabelle, grafici, mappe** e scaricare su file di testo, gran parte dei dati e degli indici elaborati attraverso il sistema.

Box plot e matrice di correlazione

Temperatura



Precipitazione



Coefficiente di correlazione di Pearson (r)

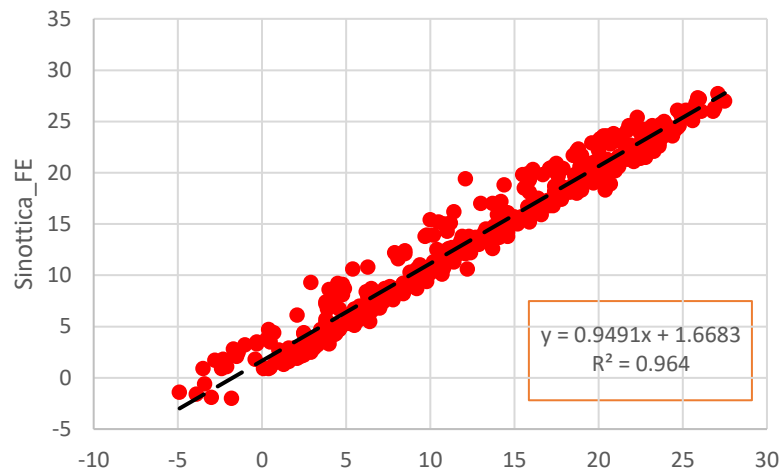
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

x_i e y_i sono i valori delle variabili e \bar{x} ed \bar{y} le loro medie.

Correlazione Temperatura

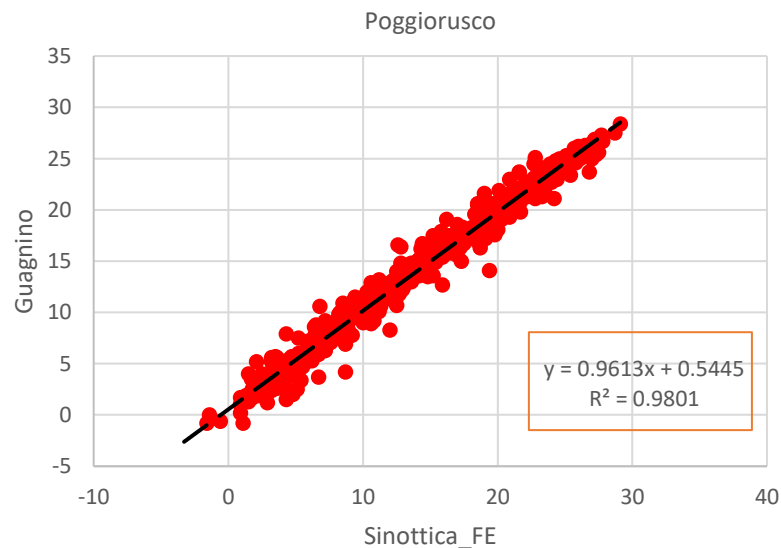
Grafici di correlazione

data	Codigoro	Poggiorusco	Guagnino	Sinottica_FE	Malalbergo
nov-02	11.9		12.3	11.4	12.5
dic-02	5.9		6.1	5.9	6.7
gen-03	3.1		3.5	3	3.4
feb-03	2.8		2.6	3.6	3.4
mar-03	9.2		9.4	10.3	10.3
apr-03	12.6		12.4	12.8	13.1
mag-03	20.3		20	21.2	20.4
giu-03	26.4		26.5	27.2	26
lug-03	25.5		26.3	26.5	25.8
ago-03	27.8		28.4	29.1	27.9
set-03	19.3		20.2	19.7	19.2
ott-03	13.3		13.8	12.9	12.6
nov-03	10.5		10.6	10.1	9.5
dic-03	5.4		5.7	4.9	4.5
gen-04	2.8		2.7	2.5	2.4
feb-04	4.7	4.4	4.4	4.7	4
mar-04	8.5	8.4	8.3	8.4	7.7
apr-04	13.9	14.1	13.4	13.7	13.1
mag-04	16.9	17.4	16.7	17.3	16.6
giu-04	22.4	22.9	22.5	23.1	22.5
lug-04	24.2	24.9	25	25.9	24.1
ago-04	24.4	25.2	25	26.1	24.4
set-04	20.1	20.6	20.7	21.2	19.7
ott-04	17.2	16.7	17.4	16.8	16.2
nov-04	9.5	9.2	9.8	8.7	8.3



data	Codigoro	Poggiorusco	Guagnino	Sinottica_FE	Malalbergo
nov-02	11.9	10.33638	12.3	11.4	12.5
dic-02	5.9	4.75003	6.1	5.9	6.7
gen-03	3.1	1.8045	3.5	3	3.4
feb-03	2.8	2.41392	2.6	3.6	3.4
mar-03	9.2	9.21911	9.4	10.3	10.3
apr-03	12.6	11.75836	12.4	12.8	13.1
mag-03	20.3	20.29024	20	21.2	20.4
giu-03	26.4	26.38444	26.5	27.2	26
lug-03	25.5	25.67345	26.3	26.5	25.8
ago-03	27.8	28.31427	28.4	29.1	27.9
set-03	19.3	18.76669	20.2	19.7	19.2
ott-03	13.3	11.65993	13.8	12.9	12.6
nov-03	10.5	9.01597	10.6	10.1	9.5
dic-03	5.4	3.73433	5.7	4.9	4.5
gen-04	2.8	1.29665	2.7	2.5	2.4
feb-04	4.7	4.4	4.4	4.7	4
mar-04	8.5	8.4	8.3	8.4	7.7
apr-04	13.9	14.1	13.4	13.7	13.1
mag-04	16.9	17.4	16.7	17.3	16.6
giu-04	22.4	22.9	22.5	23.1	22.5
lug-04	24.2	24.9	25	25.9	24.1
ago-04	24.4	25.2	25	26.1	24.4
set-04	20.1	20.6	20.7	21.2	19.7
ott-04	17.2	16.7	17.4	16.8	16.2
nov-04	9.5	9.2	9.8	8.7	8.3

data	Codigoro	Poggiorusco	Guagnino	Sinottica_FE	Malalbergo
mag-71	18.1	17.6	17.7	18.2	17.6
giu-71	21.1	20.1	20.6	20.7	20
lug-71	24.3	24.1	23.5	24.5	24
ago-71	25.5	24.9	24.8	25.6	25.4
set-71	17.8	17.4	17.7	18.2	17.9
ott-71	12.4	11.8	13.1	13.3	12.7
nov-71	7.6	6.3	8.2	7.9	7.1
dic-71	2.2	3.1	2.9	2.9	2.6
gen-72	4.3	3.4	5.3	3.8	3.5
feb-72	7.2	6.5	8.5		6.8
mar-72	10.3	9.9	11		10.5
apr-72	12.8	12.3	11.8	12.5	12.6
mag-72	17.1	17	16.4	17	16.8
giu-72	21.4	20.9	20.4	21.2	20.6
lug-72	24	22.9	23.1	22.7	22.9
ago-72	22.7	21.2	21.8	21.1	22
set-72	16.4	15.4	16.6	15.7	15.9
ott-72	12.7	11.6	12.5	12	12.7
nov-72	7.7	6.5	8.8	6.5	8.3
dic-72	4.8	3.3	5.5	3.3	3.5
gen-73	3.9	2.9	3.7	3	2.9
feb-73	5.2	3.5	4.6	4.1	4.3
mar-73	8.4	6.8	6.8	7	7
apr-73	11.6	10.7	10.8	10.1	10.7
mag-73	18.3	17.1	16.9	16.8	17.2

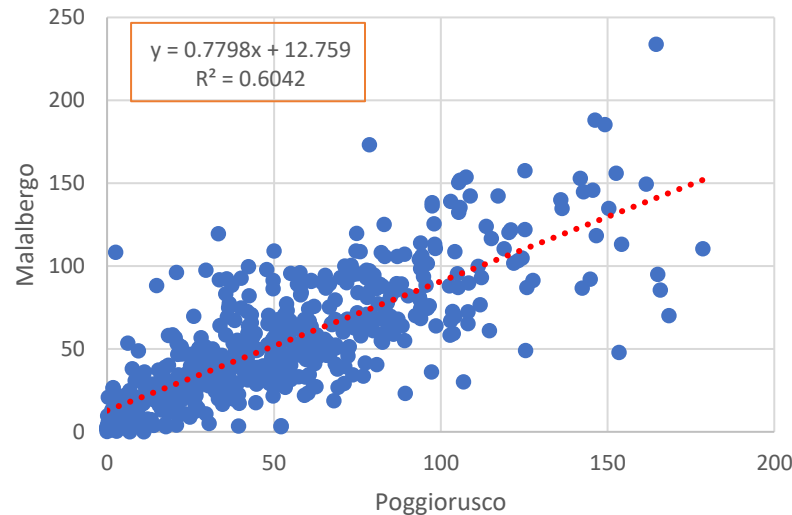


data	Codigoro	Poggiorusco	Guagnino	Sinottica_FE	Malalbergo
mag-71	18.1	17.6	17.7	18.2	17.6
giu-71	21.1	20.1	20.6	20.7	20
lug-71	24.3	24.1	23.5	24.5	24
ago-71	25.5	24.9	24.8	25.6	25.4
set-71	17.8	17.4	17.7	18.2	17.9
ott-71	12.4	11.8	13.1	13.3	12.7
nov-71	7.6	6.3	8.2	7.9	7.1
dic-71	2.2	3.1	2.9	2.9	2.6
gen-72	4.3	3.4	5.3	3.8	3.5
feb-72	7.2	6.5	8.5	8.39015	6.8
mar-72	10.3	9.9	11	10.9389	10.5
apr-72	12.8	12.3	11.8	12.5	12.6
mag-72	17.1	17	16.4	17	16.8
giu-72	21.4	20.9	20.4	21.2	20.6
lug-72	24	22.9	23.1	22.7	22.9
ago-72	22.7	21.2	21.8	21.1	22
set-72	16.4	15.4	16.6	15.7	15.9
ott-72	12.7	11.6	12.5	12	12.7
nov-72	7.7	6.5	8.8	6.5	8.3
dic-72	4.8	3.3	5.5	3.3	3.5
gen-73	3.9	2.9	3.7	3	2.9
feb-73	5.2	3.5	4.6	4.1	4.3
mar-73	8.4	6.8	6.8	7	7
apr-73	11.6	10.7	10.8	10.1	10.7
mag-73	18.3	17.1	16.9	16.8	17.2

Correlazione Precipitazione

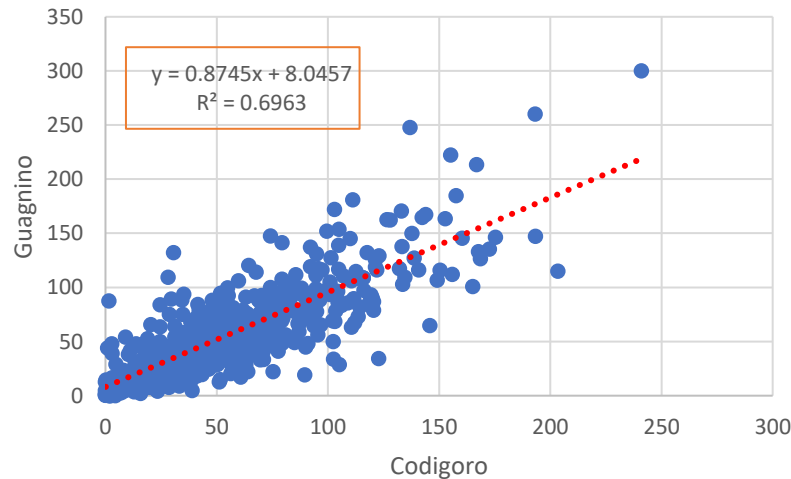
Grafici di correlazione

data	Codigoro	Poggiorusco	Guagnino	Sinottica_FE	Malalbergo
dic-64	81.4	94.8	94.6	64.4	93.6
gen-65	71	94	33.4	35.2	68.2
feb-65	3.6	0	2.2	0.6	1.8
mar-65	30.2	65.2	29.2	47	55.8
apr-65	79.8	74.8	71.8	88.6	119.6
mag-65	67	83.4	92.2	88.6	60.2
giu-65	61.8	70	52.4	90.4	93
lug-65	50.4	52	28.8	9.2	29.4
ago-65	59.8	60.4	106	53.8	74
set-65	70.6	86.6	52.8	56.4	85.2
ott-65	0.6	6	3.4	1.4	4.6
nov-65	70.6	105.2	68.2	84.2	87
dic-65	23.4	26.8	39.2	18.8	25.8
gen-66	36.8	42.2	40.22	21	34.4
feb-66	13.6	18	37.2	31.2	14
mar-66	19.2	17.4	24.2	18.6	14
apr-66	50.2	72.6	46.2	63	51.2
mag-66	27.2	38	14	27.8	21.2
giu-66	6	1.8	7.4	16	26.6
lug-66	101	67.2	93.4	63	65.2
ago-66	104.8	150.4	116.6	130.8	134.6
set-66	122.8	105.8	34.2	84.2	151.6
ott-66	77.4	104.2	78.4	91	69.4



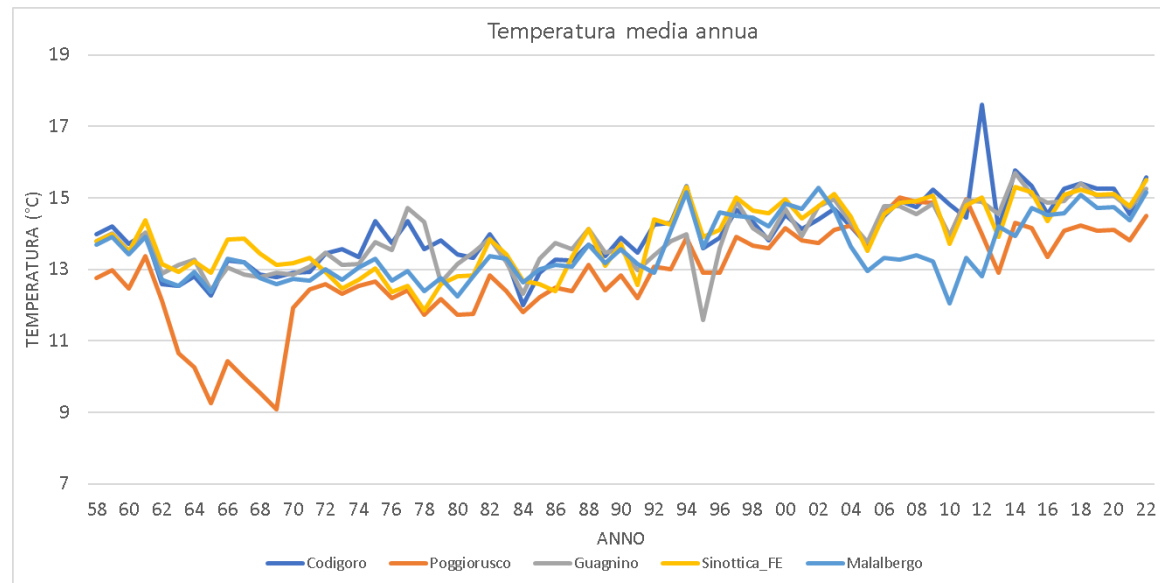
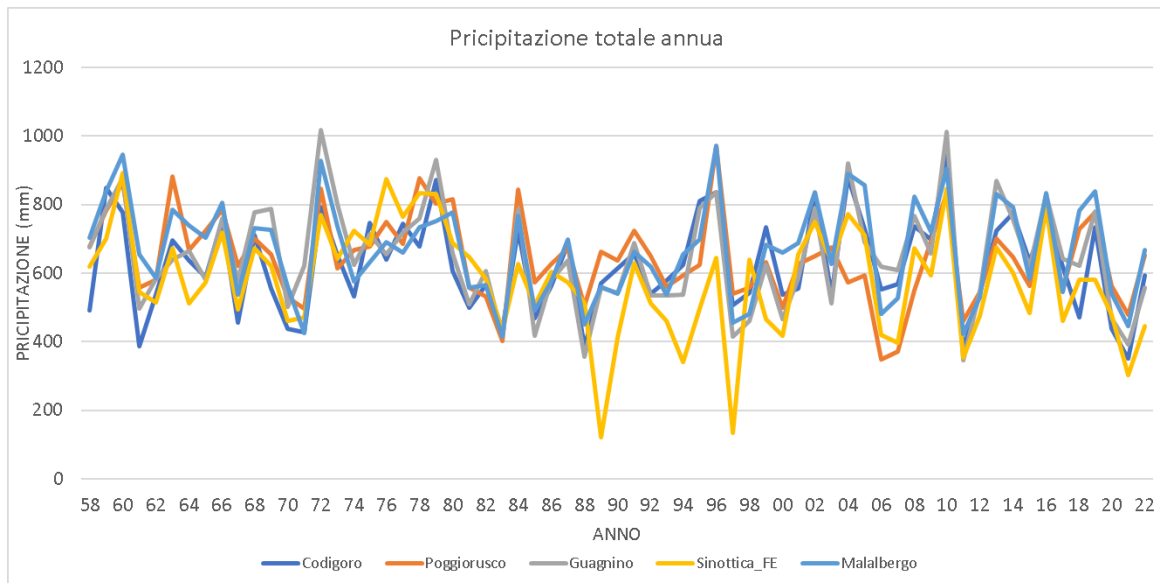
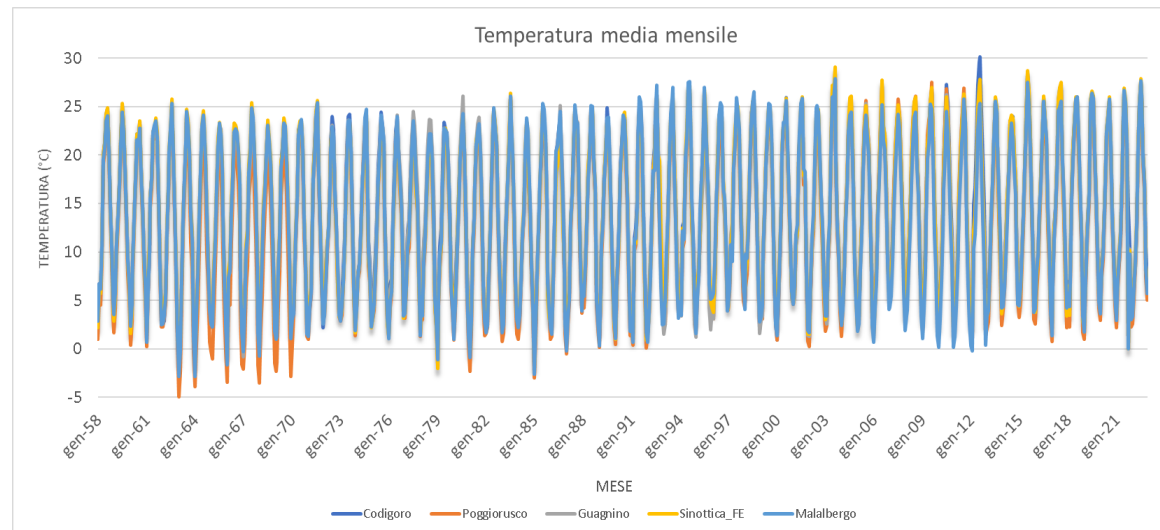
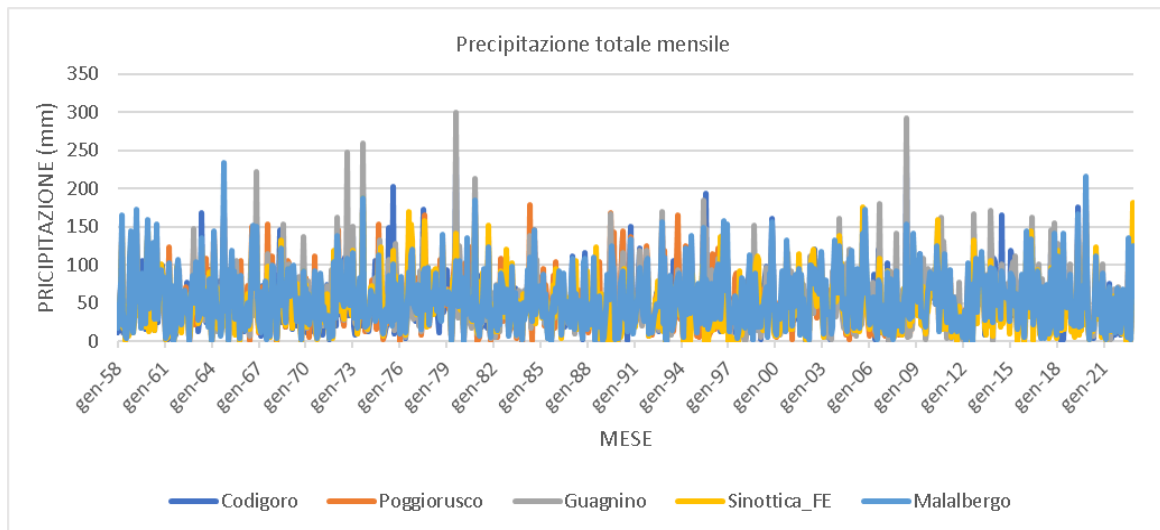
data	Codigoro	Poggiorusco	Guagnino	Sinottica_FE	Malalbergo
dic-64	81.4	94.8	94.6	64.4	93.6
gen-65	71	94	33.4	35.2	68.2
feb-65	3.6	0	2.2	0.6	1.8
mar-65	30.2	65.2	29.2	47	55.8
apr-65	79.8	74.8	71.8	88.6	119.6
mag-65	67	83.4	92.2	88.6	60.2
giu-65	61.8	70	52.4	90.4	93
lug-65	50.4	52	28.8	9.2	29.4
ago-65	59.8	60.4	106	53.8	74
set-65	70.6	86.6	52.8	56.4	85.2
ott-65	0.6	6	3.4	1.4	4.6
nov-65	70.6	105.2	68.2	84.2	87
dic-65	23.4	26.8	39.2	18.8	25.8
gen-66	36.8	37.68712	40.22	21	34.4
feb-66	13.6	18	37.2	31.2	14
mar-66	19.2	17.4	24.2	18.6	14
apr-66	50.2	72.6	46.2	63	51.2
mag-66	27.2	38	14	27.8	21.2
giu-66	6	1.8	7.4	16	26.6
lug-66	101	67.2	93.4	63	65.2
ago-66	104.8	150.4	116.6	130.8	134.6
set-66	122.8	105.8	34.2	84.2	151.6
ott-66	77.4	104.2	78.4	91	69.4

data	Codigoro	Poggiorusco	Guagnino	Sinottica_FE	Malalbergo
gen-08	44.2	30.2	30.4	45.4	47
feb-08	25.2	9.2	26.4	9.2	13
mar-08	43.2	25	68.8	34.5	39.6
apr-08	44.8	42.6	35.2	70	58.8
mag-08	41.2	40.2	56.4	57.7	74.6
giu-08	19.6	141.8	293	101	152.8
lug-08	28.8	6.2	58.2	35.4	35.4
ago-08	10	7.8	20.6	30.2	30.2
set-08	20.8	81	63.8	96	96
ott-08	21.2	22	16.4	25.9	32.8
nov-08	103.6	108.8	78.4	126.9	142.2
dic-08	71.2	67.8	58.3	100	100
gen-09	71.8	62.4	53.8	70.6	70.6
feb-09	38	39	33.7	52	52
mar-09	76.8	72	72.6	88	88
apr-09	114.4	81.8	95.9	115.2	115.2
mag-09	64	22.2	24.1	32	32
giu-09	26.8	23	21	32.2	32.2
lug-09	28.2	109.2	71.3	37.2	37.2
ago-09	10.68	2	10.9	18.6	18.6
set-09	51.2	12.8	40.8	41.8	41.8
ott-09	51.8	94.6	38.6	65.6	65.6
nov-09	85.4	53.2	55.5	78	78

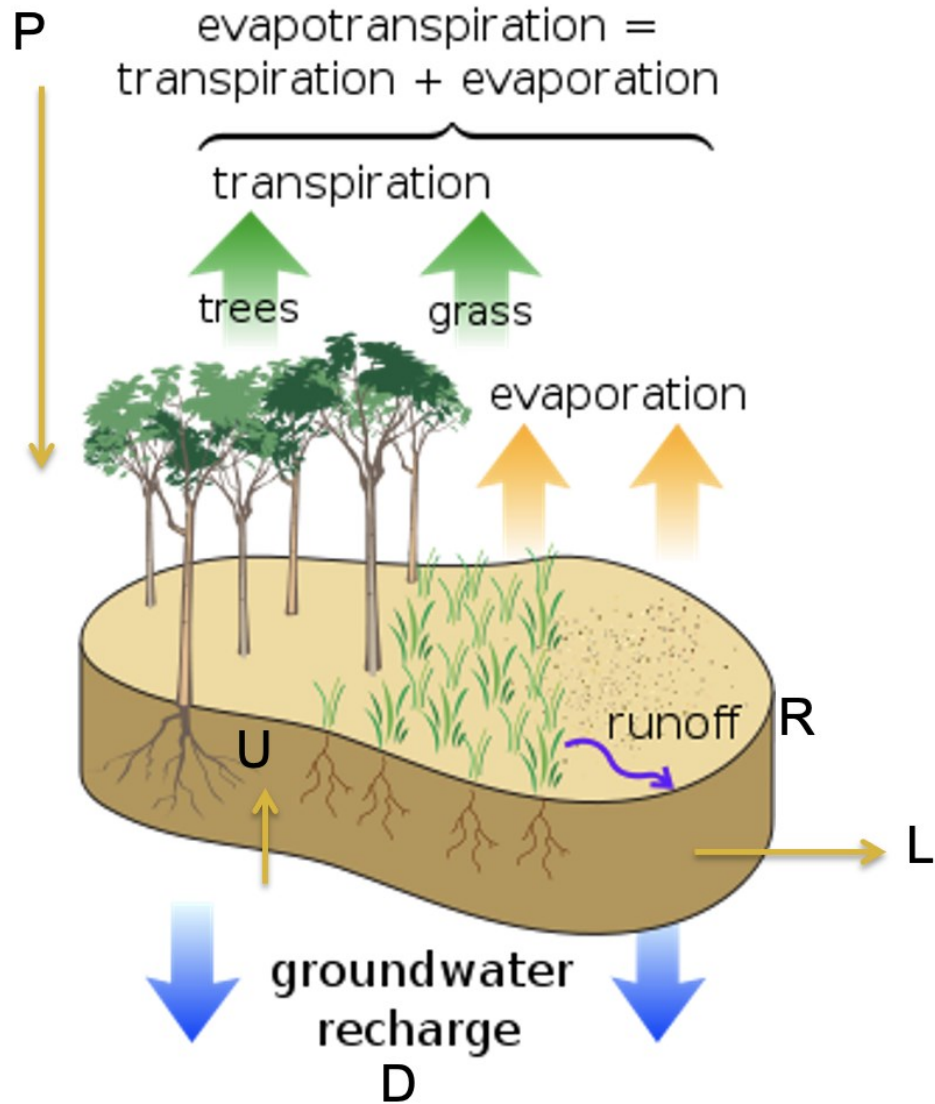


data	Codigoro	Poggiorusco	Guagnino	Sinottica_FE	Malalbergo
gen-08	44.2	30.2	30.4	45.4	47
feb-08	25.2	9.2	26.4	9.2	13
mar-08	43.2	25	68.8	34.5	39.6
apr-08	44.8	42.6	35.2	70	58.8
mag-08	41.2	40.2	56.4	57.7	74.6
giu-08	242.4033	141.8	293	101	152.8
lug-08	14.02446	28.8	6.2	58.2	35.4
ago-08	19.6	10	7.8	20.6	30.2
set-08	73.5877	81	63.8	96	96
ott-08	21.2	22	16.4	25.9	32.8
nov-08	103.6	108.8	78.4	126.9	142.2
dic-08	63.07654	67.8	58.3	100	100
gen-09	71.8	65.73488	62.4	53.8	70.6
feb-09	38	51.3236	39	33.7	52
mar-09	76.8	79.2164	72	72.6	88
apr-09	114.4	100.29096	81.8	95.9	115.2
mag-09	64	35.8276	22.2	24.1	32
giu-09	26.8	35.98256	23	21	32.2
lug-09	28.2	39.85656	109.2	71.3	37.2
ago-09	10.68	25.44528	2	10.9	18.6
set-09	51.2	43.42064	12.8	40.8	41.8
ott-09	51.8	61.86088	94.6	38.6	65.6
nov-09	85.4	71.4684	53.2	55.5	78

Serie temporali



Bilancio idrologico



Il metodo di **Thornthwaite & Mather** (1957) usa la temperatura dell'aria come indice dell'energia disponibile per l'Ep mensile (in mm). Ep viene calcolata attraverso una **formula empirica** adatta alle condizioni climatiche **italiane** (Thornthwaite, 1948):

$$Ep = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T_i}{I_t} \right)^a \cdot C_i$$

con T_i temperatura media mensile ($^{\circ}\text{C}$) e C_i coefficiente di insolazione pari a:

$$C_i = \frac{(\text{giorni}_{\text{mese}} \cdot \text{ore}_{\text{insolazione}})}{(12 \cdot 30)}$$

I_t indice termico annuale:

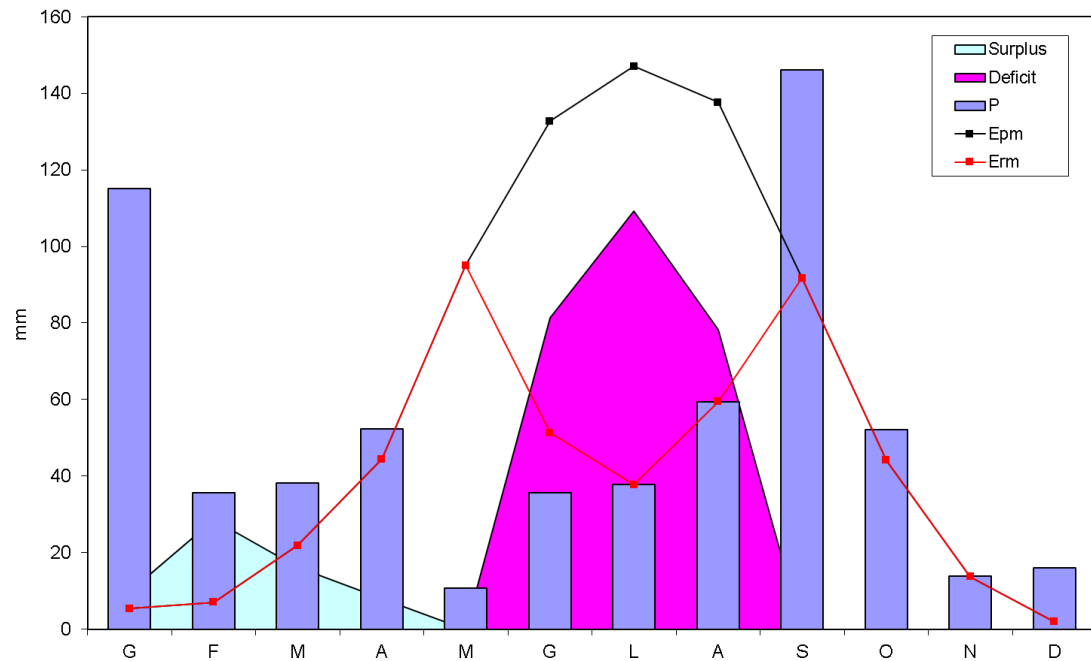
$$I_t = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$$

e

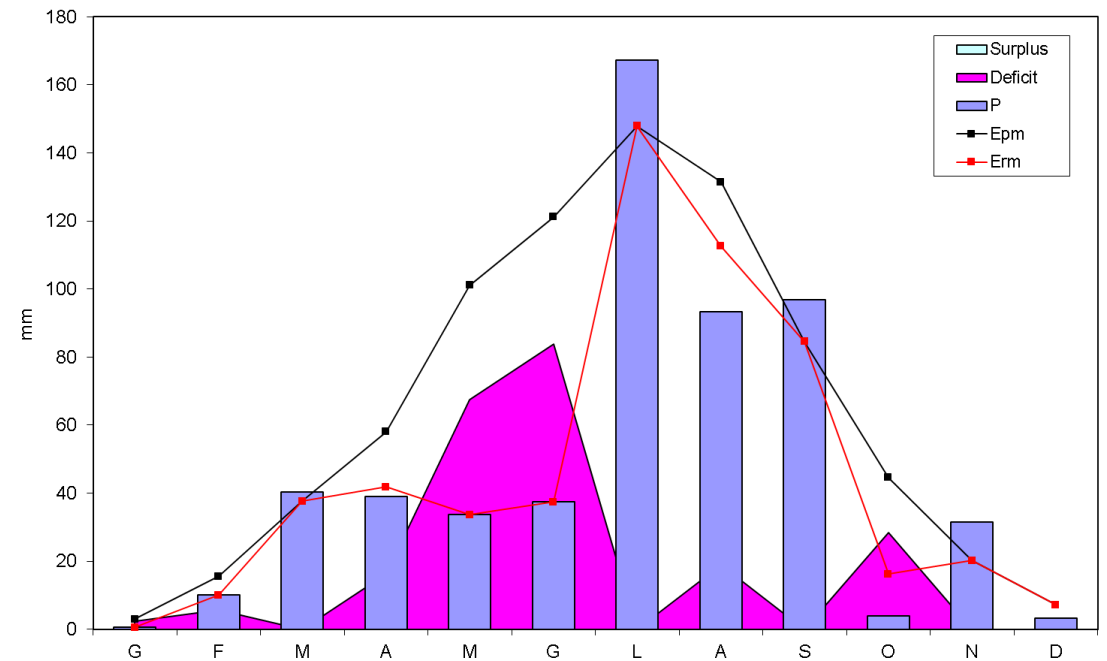
$$a = 6.74 \cdot 10^{-7} I_t^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} I_t^2 + 1.79 \cdot 10^{-2} I_t + 0.49239$$

Bilancio idrologico

Bilancio idrico secondo Thornthwaite nella stazione di Poggiorusco del 1973



Bilancio idrico secondo Thornthwaite nella stazione di Guagnino del 1989



Autocorrelazione

Data una **serie di dati continua** ed acquisita ad intervalli di tempo regolari e costanti detti lags (τ), la ACF è data da:

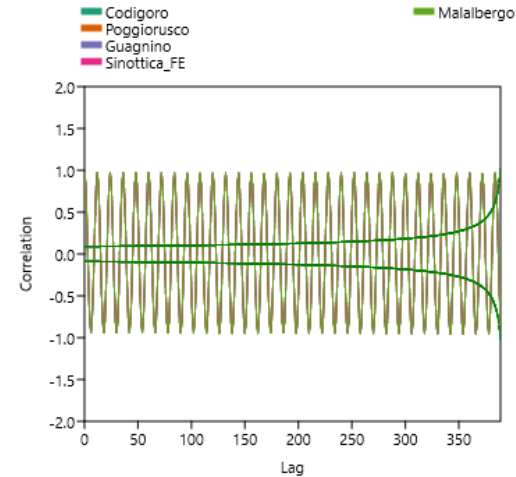
$$ACF_{\tau} = \frac{(n - \tau) \sum y_t y_{t-\tau} - (\sum y_t \sum y_{t-\tau})}{\sqrt{((n - t) \sum y_t^2 - (\sum y_t)^2)((n - t) \sum y_{t-\tau}^2 - (\sum y_{t-\tau})^2)}}$$

dove Y_t sono i valori della serie temporale.

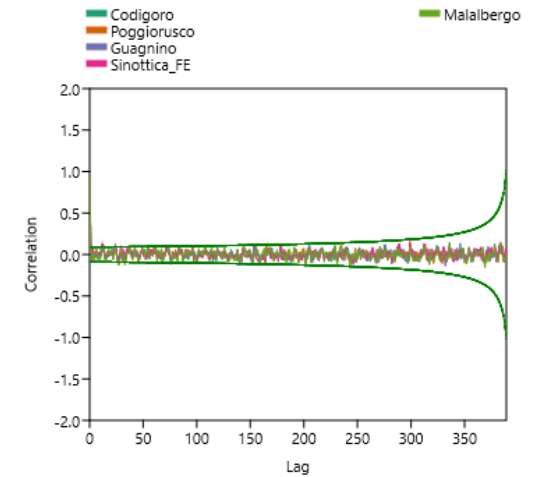
La **significatività** della ACF può essere valutata attraverso un intervallo di confidenza al 95%, dato da:

$$\pm 1,76 \sqrt{\frac{1}{n-\tau+3}}$$

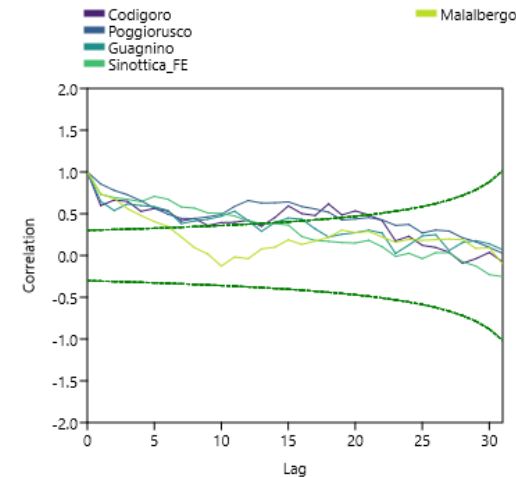
Temperatura mensile



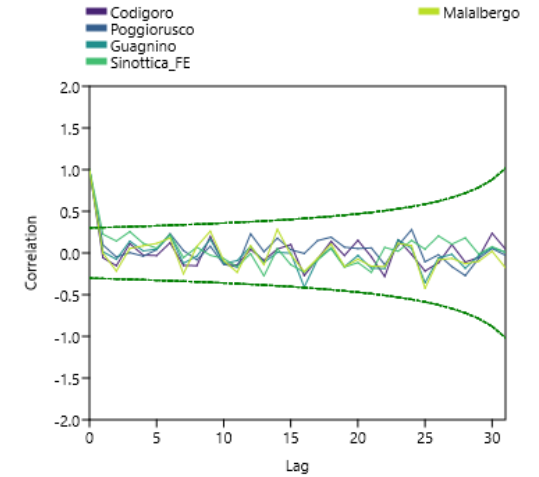
Precipitazione mensile



Temperatura annua



Precipitazione annua



Autocorrelazione

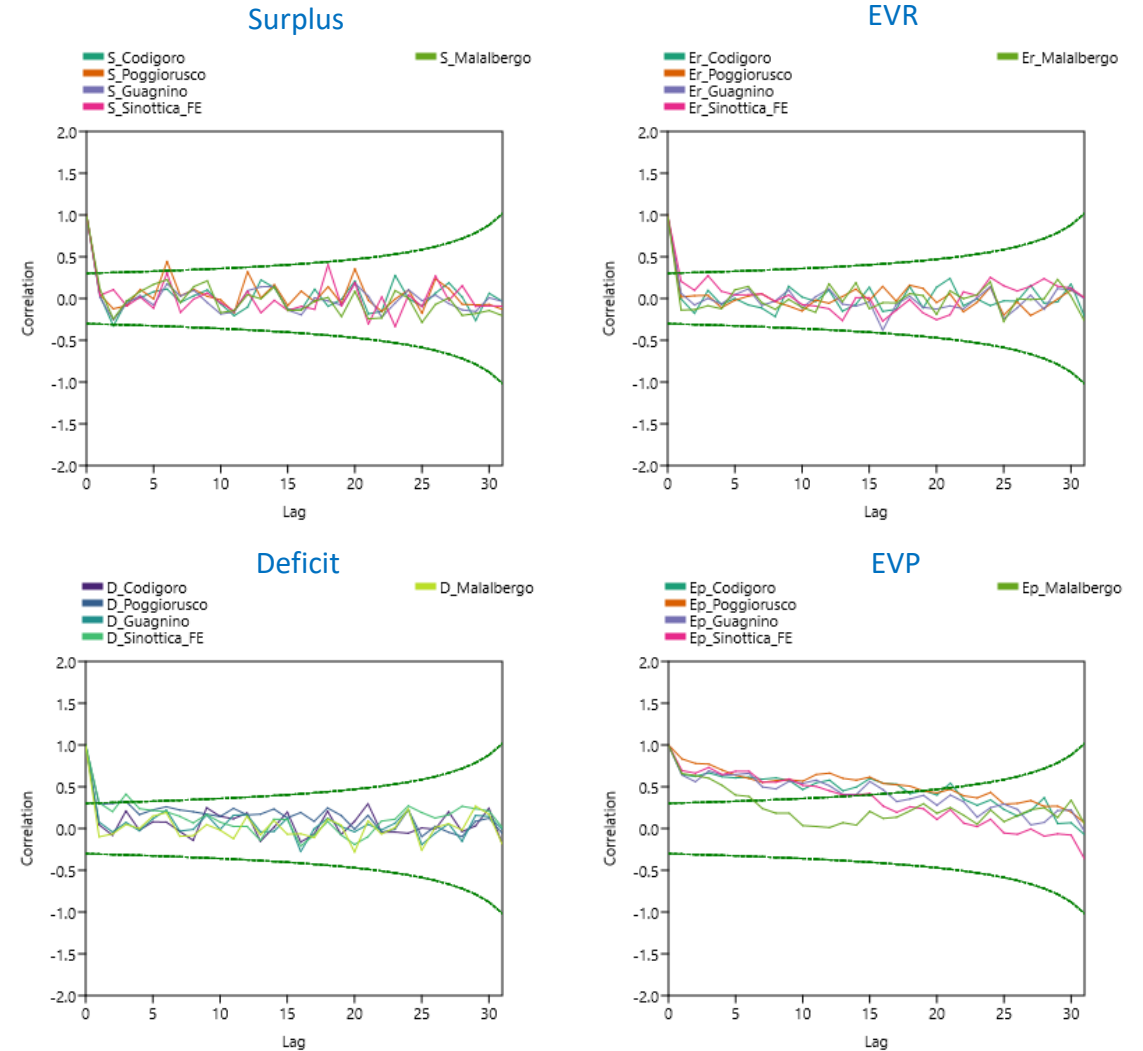
Data una **serie di dati continua** ed acquisita ad intervalli di tempo regolari e costanti detti lags (τ), la ACF è data da:

$$ACF_{\tau} = \frac{(n - \tau) \sum y_t y_{t-\tau} - (\sum y_t \sum y_{t-\tau})}{\sqrt{((n - t) \sum y_t^2 - (\sum y_t)^2)((n - t) \sum y_{t-\tau}^2 - (\sum y_{t-\tau})^2)}}$$

dove Y_t sono i valori della serie temporale.

La **significatività** della ACF può essere valutata attraverso un intervallo di confidenza al 95%, dato da:

$$\pm 1,76 \sqrt{\frac{1}{n-\tau+3}}$$



Test di Mann-Kendall (M-K)

Test non parametrico che analizza la **differenza** nei valori tra coppie di punti precedenti e successivi di una **serie temporale** spaziata in modo uniforme e non. Il test prevede il calcolo e l'analisi della **statistica S**, secondo:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (X_j - X_i) < 0 \end{cases}$$

dove X_i è il valore della variabile misurata al tempo t_i con $i = 1, 2, \dots, n$ e con $j > i$

Stimatore di Theil-Sen

Test non parametrico che analizza la pendenza tra le coppie di valori di una serie temporale spaziata in modo uniforme e non. Il test valuta la mediana di tutte i valori di pendenza (m) calcolati secondo:

$$m = \frac{(Y_j - Y_i)}{(X_j - X_i)}$$

dove X_i è il valore della variabile misurata al tempo Y_i con $i = 1, 2, \dots, n$, e con $j > i$.

Regressione lineare semplice (OLS)

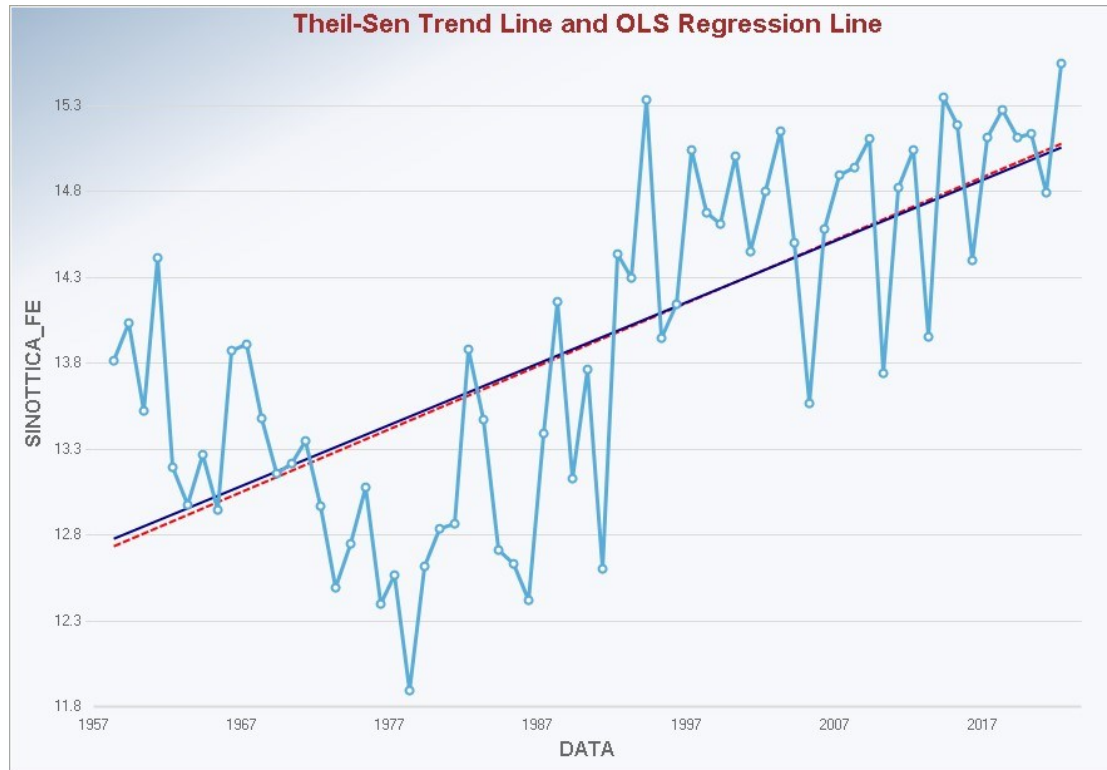
Con il modello OLS la variabile climatologica $y(t)$ è espressa come:

$$y(t) = a + b \cdot f(t) + e(t)$$

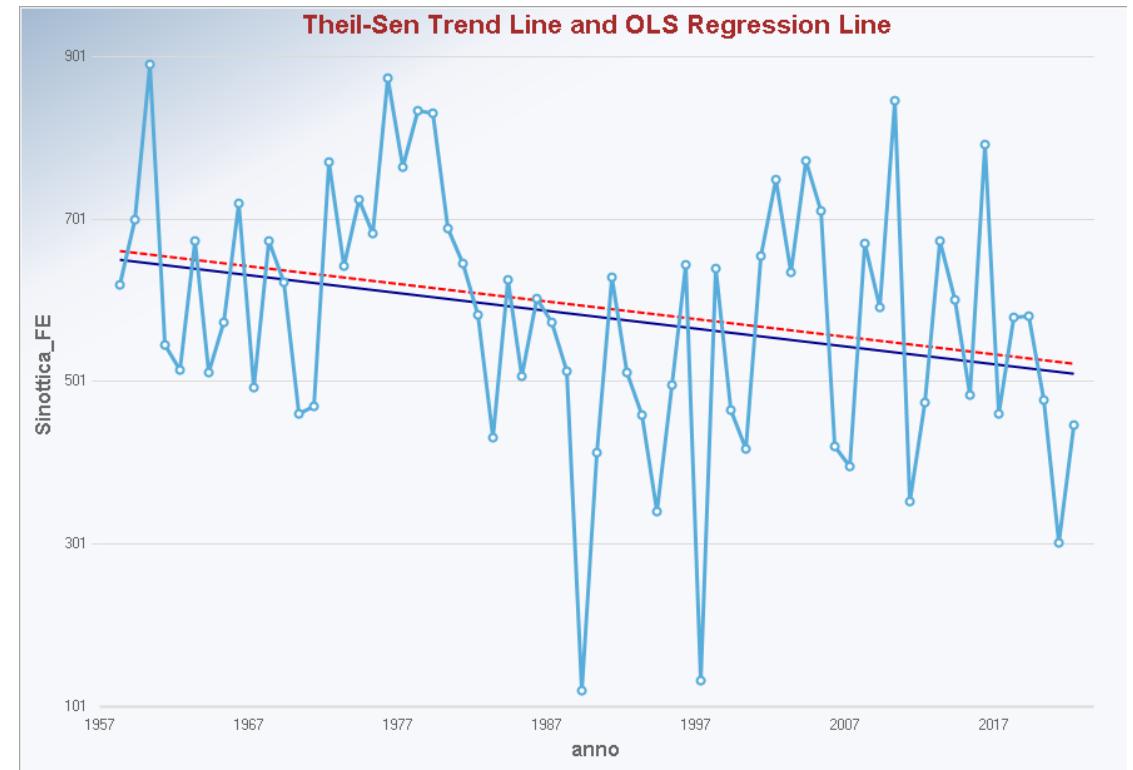
dove $f(t)$ è il valore atteso di $y(t)$, $e(t)$ è l'errore legato alla variabilità casuale del fenomeno ed a e b sono i coefficienti della regressione.

Tendenze climatiche

Temperatura annua Sinottica FE

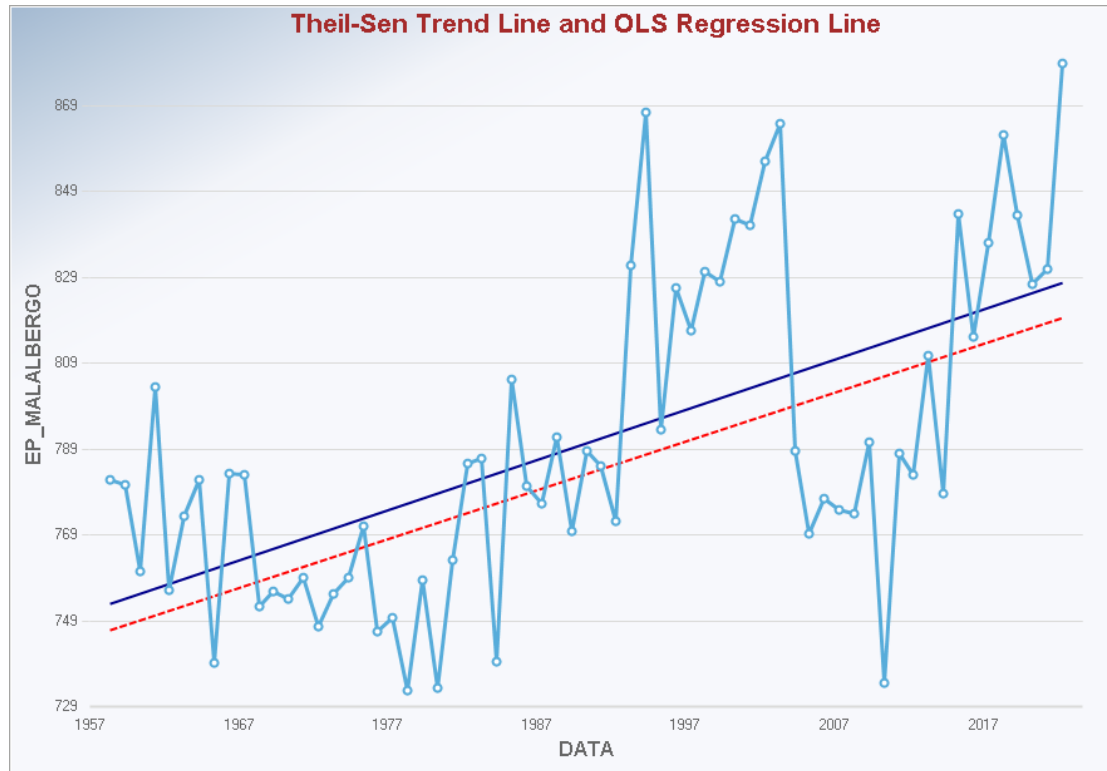


Precipitazione annua Sinottica FE

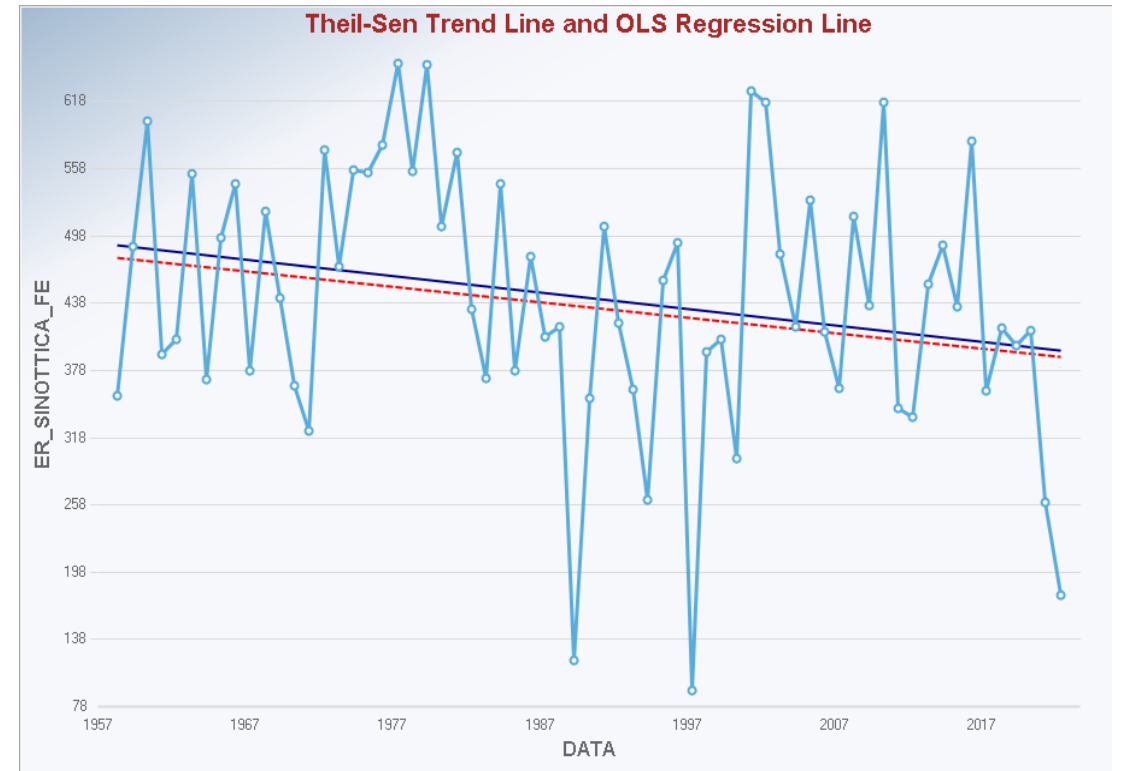


Tendenze climatiche

EP Sinottica FE

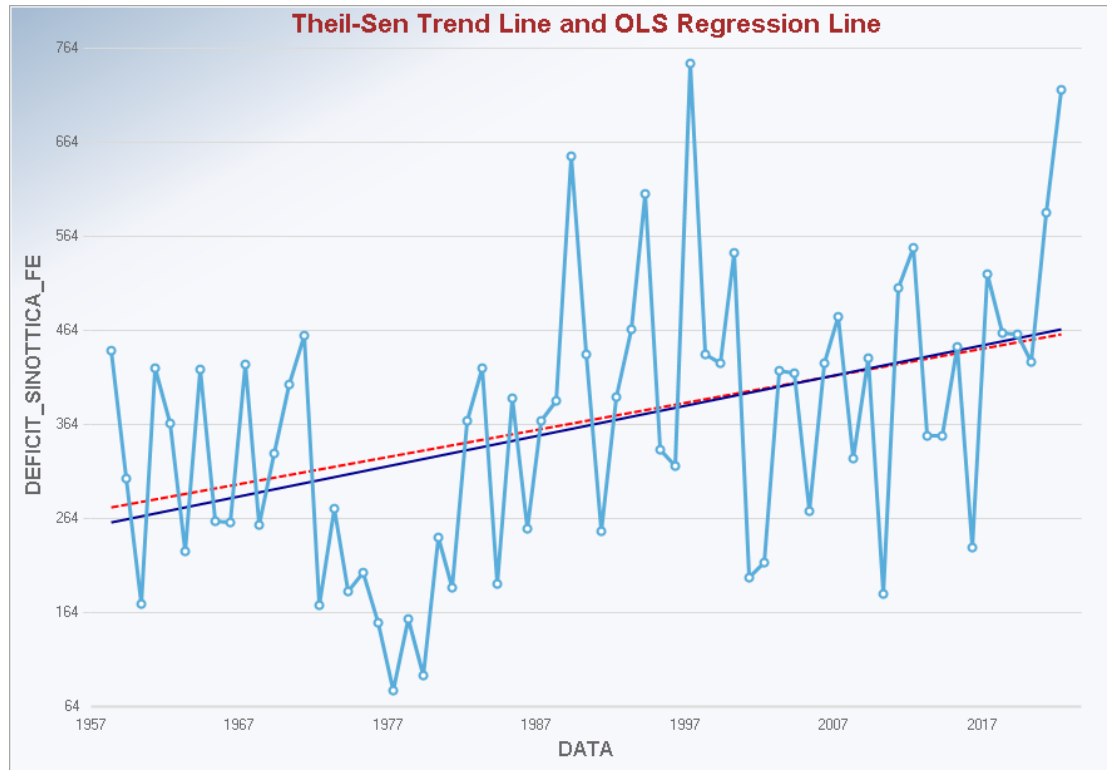


ER Sinottica FE

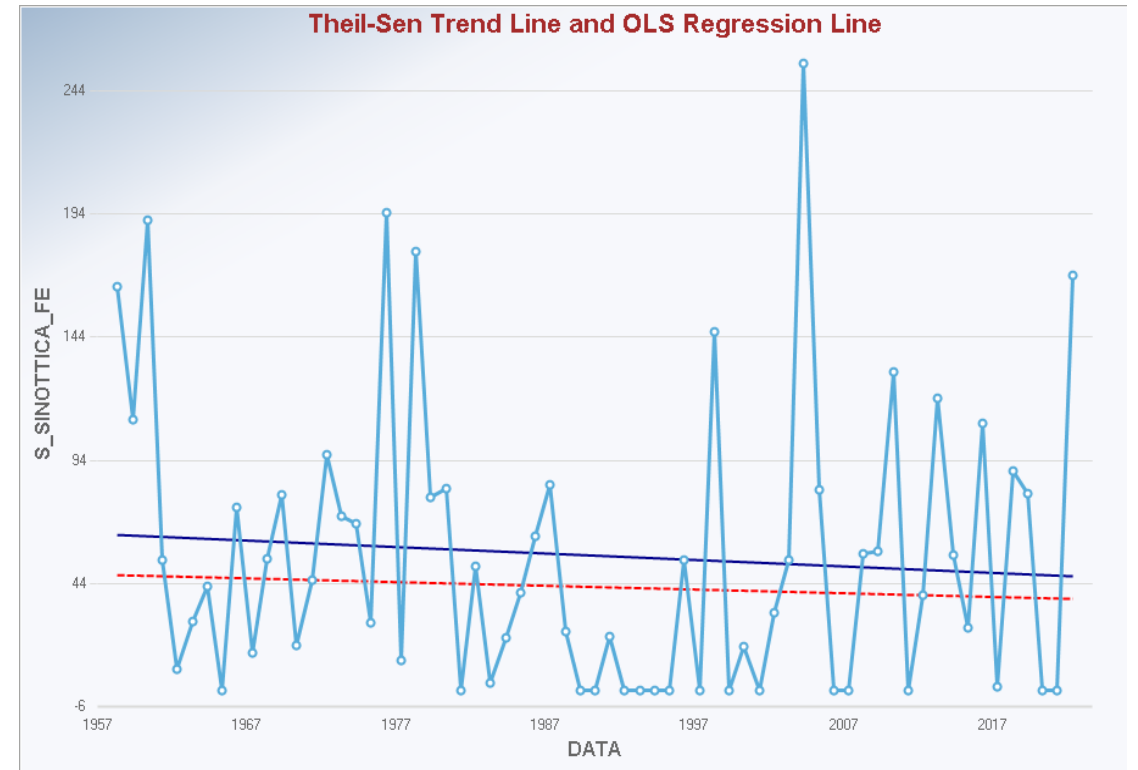


Tendenze climatiche

Deficit Sinottica FE



Surplus Sinottica FE



Risultati dei test statistici

POGGIORUSCO						
PARAMETRO	SIGLA	OLS	T-S	S	P-VALUE	SIGNIFICATIVITA'
Precipitazione mensile	Pm	-4.0E-04	-3.0E-04	-12545	0.0422	no
Temperatura mensile	Tm	2.0E-04	1.6E-04	27221	9.02E-05	si
Precipitazione annua	Pa	-1.8086	-1.789	-368	0.0189	si
Temperatura annua	Ta	0.0558	0.053	1236	1.36E-12	si
Evapotraspirazione potenziale annua	Ep	2.3156	2.328	1293	1.29E-13	si
Evapotraspirazione reale annua	Er	-0.6721	-0.54	-180	0.155	no
Deficit annuo	D	0.0775	0.0846	676	6.63E-05	si
Surplus annuo	S	-0.0964	-0.0974	-295	0.0164	si

SINOTTICA_FE

PARAMETRO	SIGLA	OLS	T-S	S	P-VALUE	SIGNIFICATIVITA'
Precipitazione mensile	Pm	-5.0E-04	-5.3E-04	-22745	8.76E-04	si
Temperatura mensile	Tm	1.0E-04	1.0E-04	18519	5.42E-03	si
Precipitazione annua	Pa	-2.1877	-2.164	-398	0.0123	si
Temperatura annua	Ta	0.0356	0.0367	999	8.02E-09	si
Evapotraspirazione potenziale annua	Ep	1.1723	1.725	1052	1.34E-09	si
Evapotraspirazione reale annua	Er	-0.14677	-1.387	-324	0.0337	no
Deficit annuo	D	3.2072	2.89	612	2.71E-04	si
Surplus annuo	S	-0.2571	-0.151	-216	0.112	no

MALALBERGO

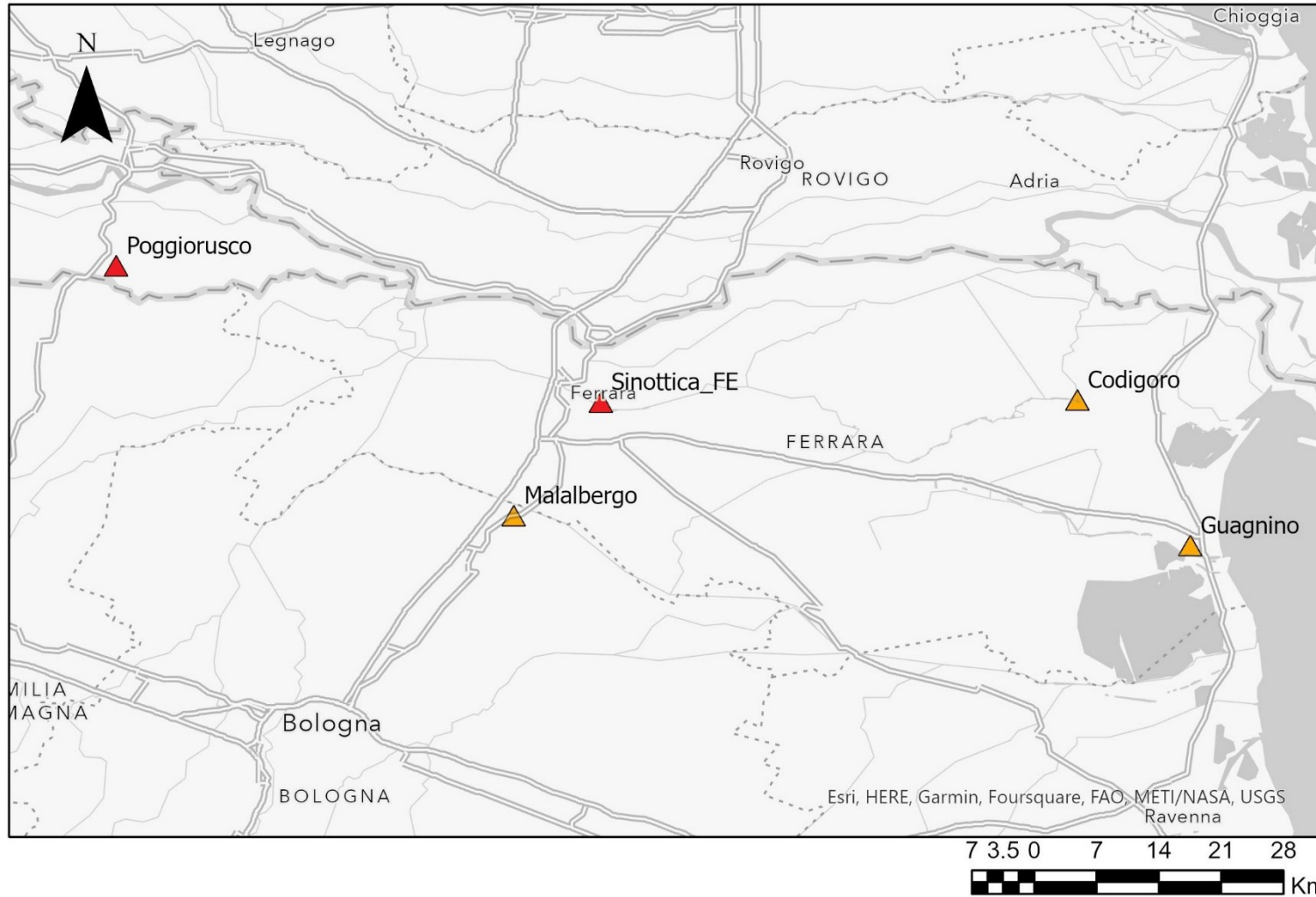
PARAMETRO	SIGLA	OLS	T-S	S	P-VALUE	SIGNIFICATIVITA'
Precipitazione mensile	Pm	-1.0E-04	-8.3E-05	-3295	3.25E-01	no
Temperatura mensile	Tm	1.0E-04	7.5E-05	13635	3.03E-02	si
Precipitazione annua	Pa	-0.5328	-0.701	-125	0.241	no
Temperatura annua	Ta	0.0256	0.0263	851	7.45E-07	si
Evapotraspirazione potenziale annua	Ep	1.1723	1.138	864	5.15E-07	si
Evapotraspirazione reale annua	Er	0.0788	0.0418	6	0.489	no
Deficit annuo	D	1.0935	1.228	304	4.31E-02	no
Surplus annuo	S	-4688	-0.375	-168	0.172	no

CODIGORO						
PARAMETRO	SIGLA	OLS	T-S	S	P-VALUE	SIGNIFICATIVITA'
Precipitazione mensile	Pm	1.0E-04	4.3E-05	1833	0.401	no
Temperatura mensile	Tm	1.0E-04	1.0E-04	19620	0.0347	si
Precipitazione annua	Pa	1.8E-01	1.7E-01	29	0.437	no
Temperatura annua	Ta	3.7E-02	3.8E-02	1208	4.13E-12	si
Evapotraspirazione potenziale annua	Ep	1.5E+00	1.5E+00	1245	9.38E-13	si
Evapotraspirazione reale annua	Er	-3.7E-01	-4.2E-01	-112	0.265	no
Deficit annuo	D	4.9E-02	5.4E-02	440	6.5E-03	si
Surplus annuo	S	3.4E-01	2.0E-02	149	0.199	no
GUAGNINO						
PARAMETRO	SIGLA	OLS	T-S	S	P-VALUE	SIGNIFICATIVITA'
Precipitazione mensile	Pm	-2.0E-04	-2.4E-04	-9678	0.0915	no
Temperatura mensile	Tm	1.0E-04	9.6E-05	18230	6.07E-03	si
Precipitazione annua	Pa	-9187	-0.95	-159	0.186	no
Temperatura annua	Ta	0.033	0.0355	1177	1.39E-11	si
Evapotraspirazione potenziale annua	Ep	1.5736	1.613	1240	1.15E-12	si
Evapotraspirazione reale annua	Er	-0.3184	-0.355	-88	0.311	no
Deficit annuo	D	1.8921	1.992	414	9.69E-03	si
Surplus annuo	S	-0.4748	-0.134	-90	0.307	no

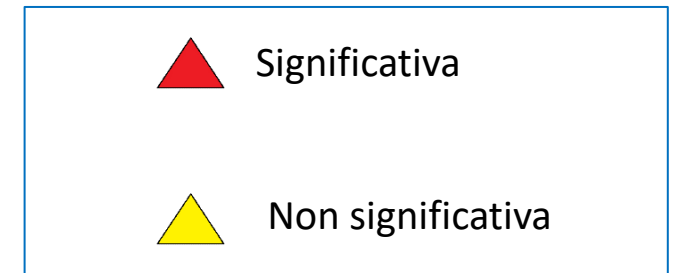
Conclusioni

- **Temperatura:** tutte le stazioni presentano un trend di incremento significativo con valori compresi tra 0.053 °C/anno e 0.0263 °C/anno.
- **Precipitazione:** la stazione di Ferrara Sinottica presenta un trend di decremento significativo sia per i valori mensili che per quelli annui, la stazione di Poggiorusco solamente per quelli annui, mentre le restanti stazioni non presentano alcun trend.
- **Evapotraspirazione Potenziale:** tutte le stazioni presentano un trend di incremento significativo.
- **Evapotraspirazione Reale:** nessuna stazione presenta trend significativi.
- **Deficit:** tutte le stazioni ad eccezione di Malalbergo presentano trend di incremento significativi.
- **Surplus:** nessuna stazione presenta trend significativi.

Conclusioni



Significatività variazione precipitazioni
dal 1958 al 2022



Grazie per l'attenzione!