



VARIAZIONE DI LUNGO PERIODO DEL LIVELLO DEL MARE NEL NORD ADRIATICO E STAGIONALITÀ

*Sara Morucci, Marco Cordella, Franco Crosato, Maurizio Ferla (ISPRA),
Antonio Rusconi (Università di Venezia, IUAV)*

21 Settembre 2017

*RemTech Expo 2017 (20, 21, 22 Settembre) FerraraFiere
www.remtechexpo.com*

Ferrara Fiere Congressi, Ferrara

Introduzione

- **Il livello del mare e la variazione di lungo periodo**

L'ALTO ADRIATICO E LA LAGUNA DI VENEZIA

Osservazioni:

- Reti di monitoraggio
- I dati

- **Il Modello STL**

- Il modello Seasonal Trend decomposition using Loess (STL)

- **Stagionalità**

- **Risultati**

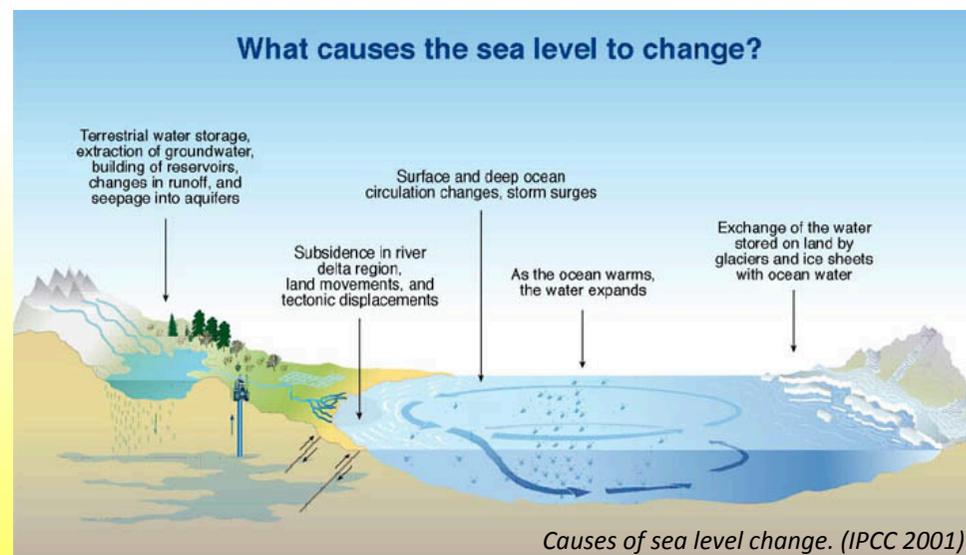
IL LIVELLO DEL MARE

COSA MISURIAMO

Livello del mare: livello medio del mare + effetti di breve periodo
+ effetti di lungo periodo

EFFETTI DI BREVE PERIODO

- marea astronomica
- effetti meteorologici
(vento e pressione atmosferica, storm surge, tsunami)



IL LIVELLO DEL MARE

$$Z_0(t) =$$

$$\overline{Z_0} + at$$

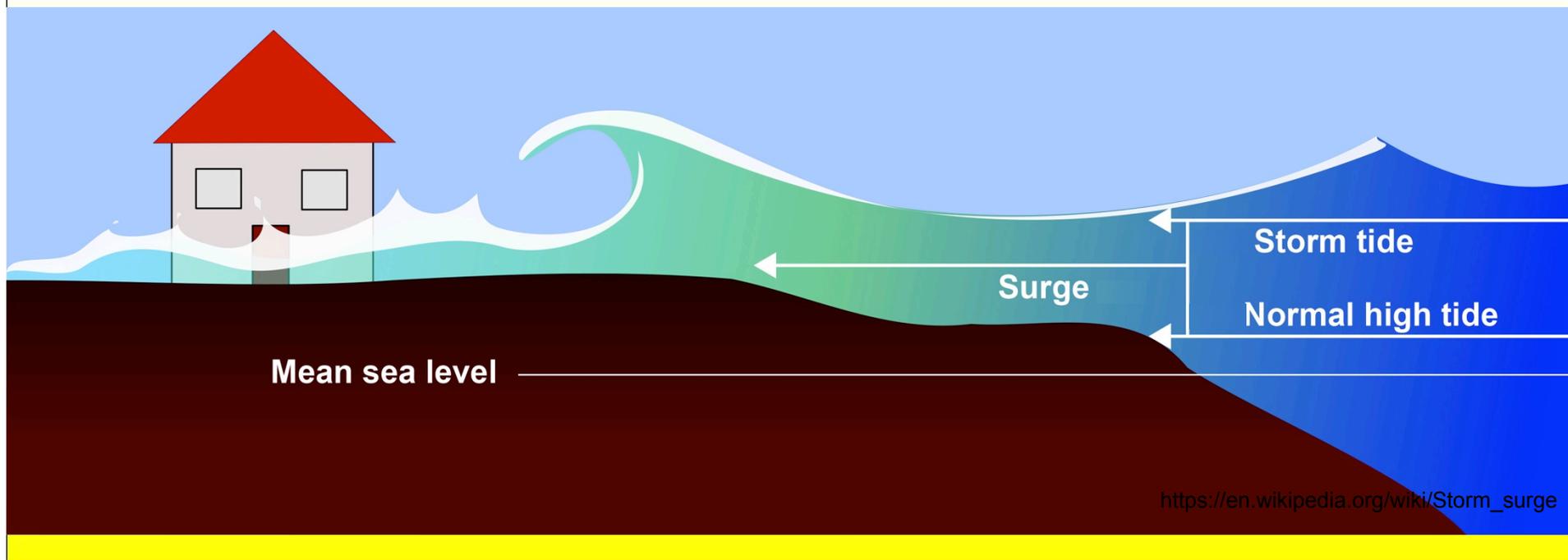
$$N + S_a + S_{sa}$$

$$M_{eff}$$

livello medio a lungo termine + trend

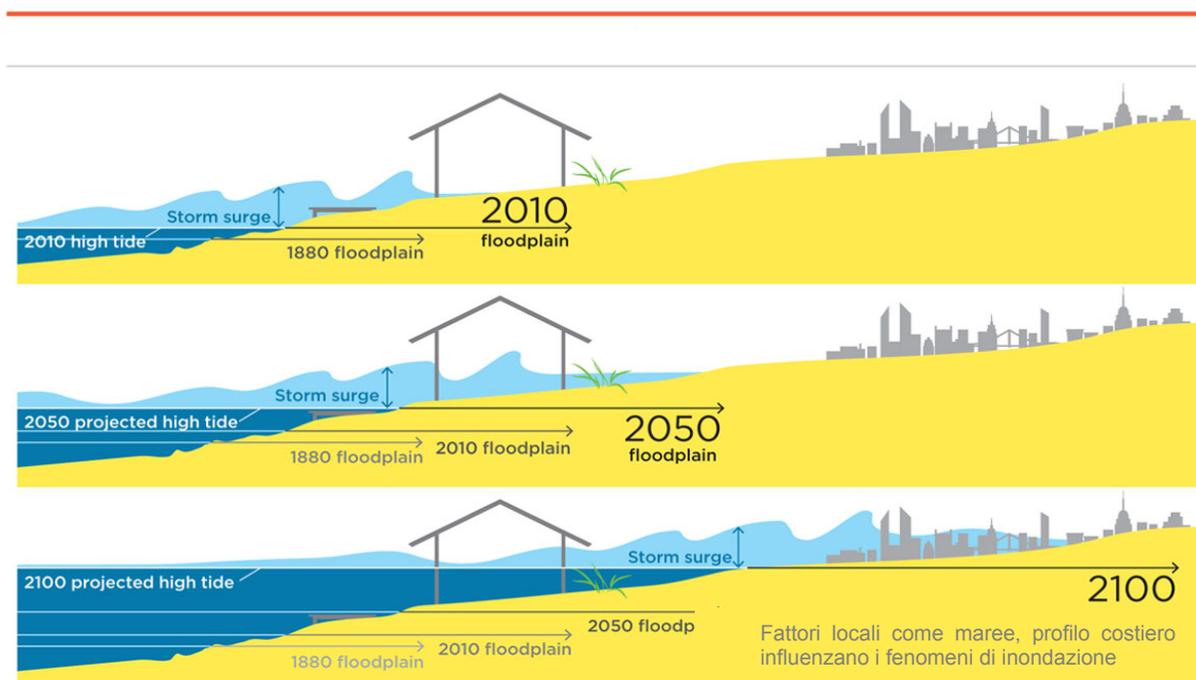
componente armonica

componente meteorologica



IL LIVELLO DEL MARE

PERCHÈ MISURARLO?



Il livello medio del mare definisce un livello di riferimento per gli storm-surge. L'aumento del livello medio del mare può favorire l'ingresso dell'acqua sulla terraferma (aumentando il rischio di inondazione)

© Union of Concerned Scientists 2015; www.uccusa.org/sealevelrisescience

<https://toolkit.climate.gov/topics/coastal/sea-level-rise>

Parris, A., P. Bromirski, V. Burkett, D. Cayan, M. Culver, J. Hall, R. Horton, K. Knutti, R. Moss, J. Obeysekera, A. Sallenger, and J. Weiss (2012): *Global Sea Level Rise Scenarios for the United States National Climate Assessment*. NOAA Tech Memo OAR CPO-1. 37 pp.



ISPRA

IL LIVELLO DEL MARE IN ALTO ADRIATICO

PERCHÈ IN ALTO ADRIATICO?

IL LIVELLO DEL MARE IN ALTO ADRIATICO

- La laguna di VENEZIA è in Italia una delle aree maggiormente esposte ai fenomeni mareali e al rischio di inondazione sia per l'innalzamento del livello del mare che per gli storm surge: l'ACQUA ALTA
- La variazione del livello del mare e la sua predizione sono fondamentali per prevenire e limitare i danni da inondazione costiera
- Il fine è di fronteggiare gli effetti indesiderati associati ai fenomeni di sovrizzo: allagamenti della città di Venezia, accessibilità dei porti, rischio di esondazione dovuto al rigurgito alle foci fluviali, navigazione a Venezia ecc.

IL LIVELLO DEL MARE

La Direttiva 2007/60/UE relativa alla gestione del rischio alluvioni prevede la definizione di scenari di rischio che includono le inondazioni marine.

- Le grandezze fisiche che generano le condizioni di pericolosità sono quelle che concorrono a determinare il livello massimo totale H_{tot} di risalita di una mareggiata lungo un tratto di litorale in esame e che vengono per semplicità analizzati separatamente

$$H_{tot} = L_{MM} + H_{astr} + H_{surge} + W_{up} + R_{up}$$

L_{MM} il livello medio mare

H_{astr} l'altezza relativa alla marea astronomica

H_{surge} il sovrizzo di marea (differenza tra marea osservata e altezza di marea astronomica)

W_{up} il set-up costiero dovuto al frangimento delle onde sottocosta

R_{up} il livello massimo di risalita dell'onda lungo profilo di spiaggia emersa

- I primi tre termini $L_{MM} + H_{astr} + H_{surge}$, possono essere dedotti e calcolati direttamente attraverso i dati delle registrazioni puntuali dei livelli di marea
- Il quarto e il quinto termine $W_{up} + R_{up}$, riconducibili all'effetto impulsivo del moto ondoso sul litorale e possono essere ottenuti da modelli
- Nel Nord Adriatico, i primi tre termini sono quelli che, per varie ragioni, danno il contributo maggiore nella valutazione del livello massimo totale H_{tot} . Qui infatti le escursioni di marea in condizioni normali raggiungono valori di circa 1 m e risultano tra le più elevate nel Mediterraneo. Inoltre, a causa della conformazione semichiusa del bacino e della relativamente bassa profondità dei fondali (circa 20 m) nella parte medio alta, i sovrizzi di marea innescati da effetti meteorologici possono superare anche il metro in dipendenza dei gradienti barici negativi

IL LIVELLO DEL MARE IN ALTO ADRIATICO

I DATI

- Rete Mareografica Nazionale (RMN) e Rete Mareografica della Laguna di Venezia (RMLV) sono le due reti di monitoraggio gestite da ISPRA che garantiscono misurazioni del livello del mare su tutto il territorio nazionale e nella LAGUNA di **VENEZIA**

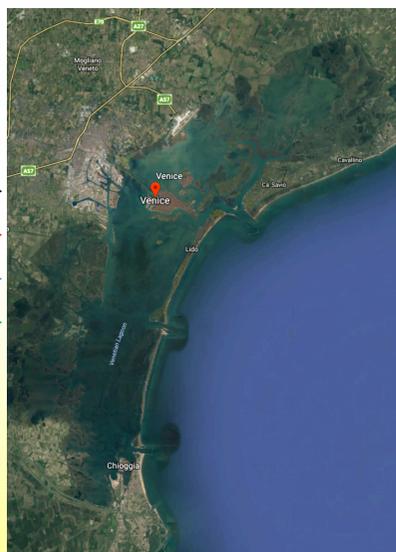
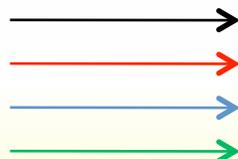
- I sensori attivi nelle stazioni forniscono osservazioni di

 - livello del mare (ogni 10 min)
 - temperatura dell'acqua (orari)

- E i seguenti parametri meteo

 - velocità e direzione del vento a 10 m
 - pressione atmosferica
 - temperatura dell'aria

I DATI DEL MAREOGRAFO DI VENEZIA

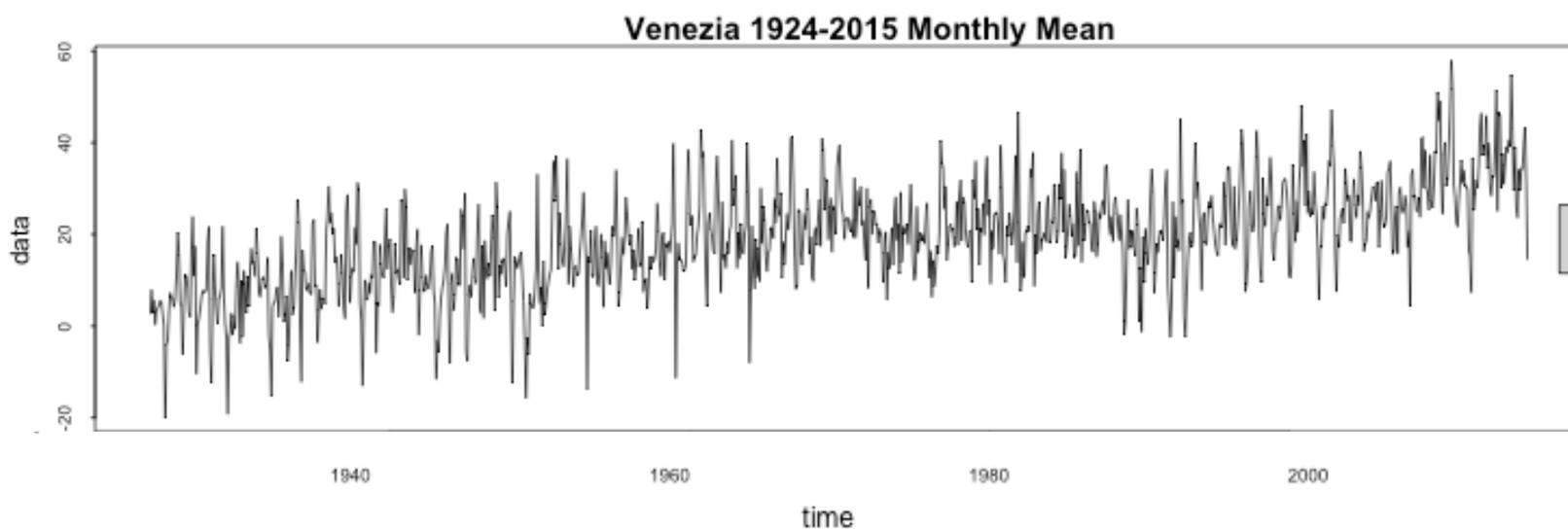


- STAZIONE di PUNTA DELLA SALUTE
- Dati osservati orari
- 1924 - 2015



Dati medi mensili

I DATI DEL MAREOGRAFO DI VENEZIA

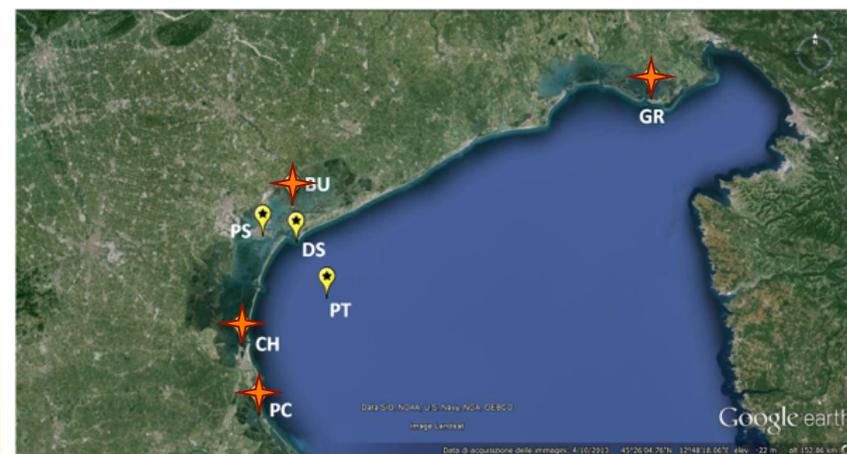


- STAZIONE di PUNTA DELLA SALUTE
- Dati osservati orari
- 1924 – 2015 (circa 90 anni)



Dati medi mensili

LA LAGUNA DI VENEZIA



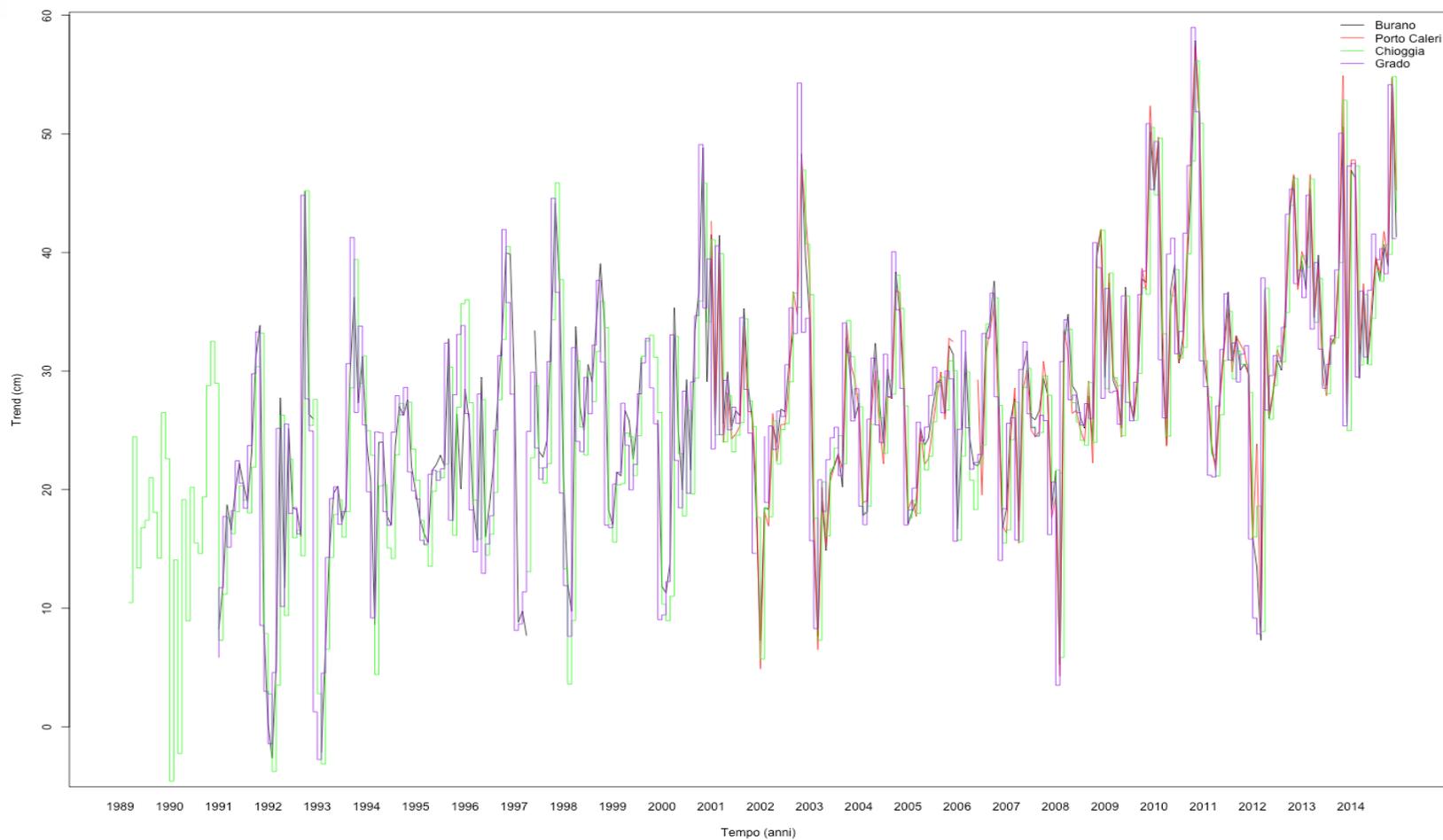
- STAZIONI
- Medie mensili



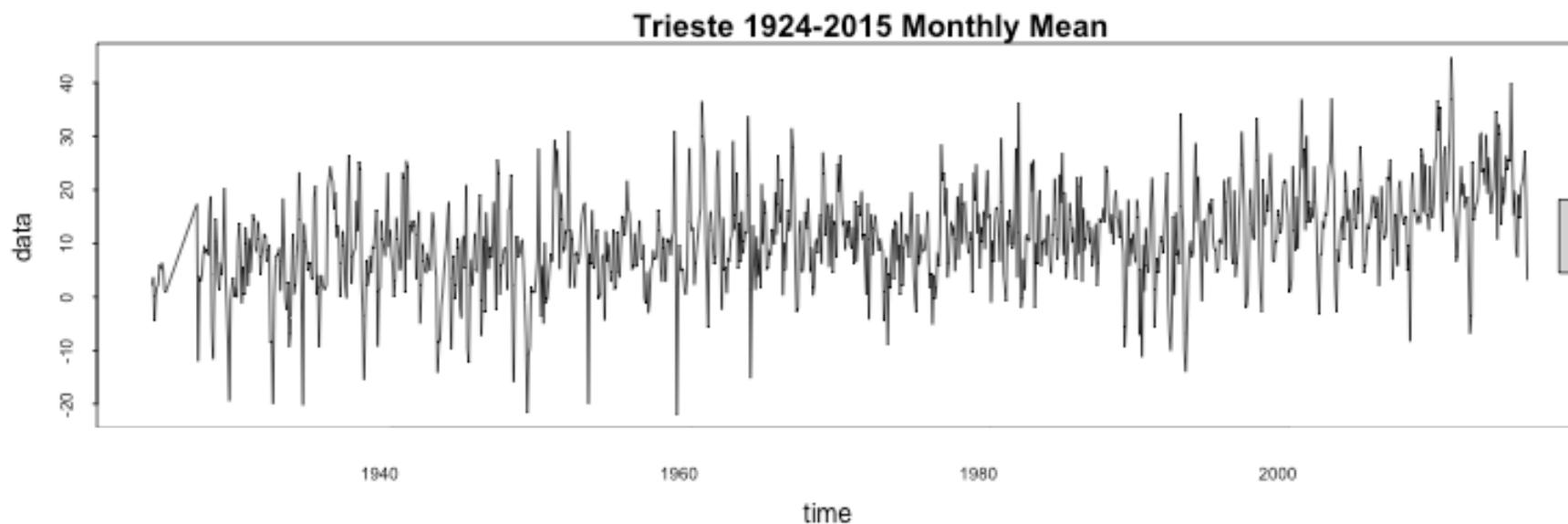
| | | |
|---|--------------|-------------|
|  | CHIOGGIA | 1989 - 2014 |
|  | BURANO | 1991 - 2014 |
|  | PORTO CALERI | 2001 - 2014 |
|  | GRADO | 1991 - 2014 |

LA LAGUNA DI VENEZIA

DATI DI LIVELLO DEL MARE - LAGUNA DI VENEZIA



I DATI DEL MAREOGRAFO DI TRIESTE



- STAZIONE di TRIESTE CNR-ISMAR
- 1924 – 2015 (circa 90 anni)



Dati medi mensili

Introduzione

- **Il livello del mare e la variazione di lungo periodo**

L'ALTO ADRIATICO E LA LAGUNA DI VENEZIA

Osservazioni:

- Reti di monitoraggio
- I dati

- **Il Modello STL**

- Il modello Seasonal Trend decomposition using Loess (STL)

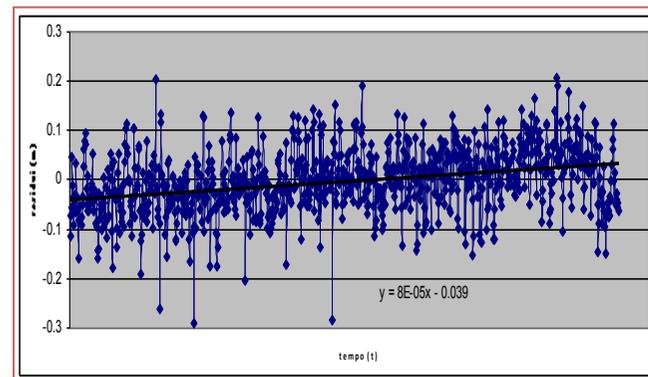
- **Stagionalità**

- **Risultati**

METODOLOGIE PER L' ANALISI DEI DATI

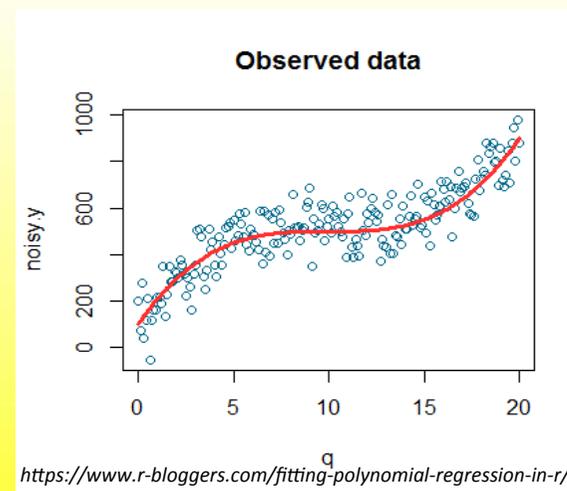
- Trend Lineare

$$y_t = a + bt$$



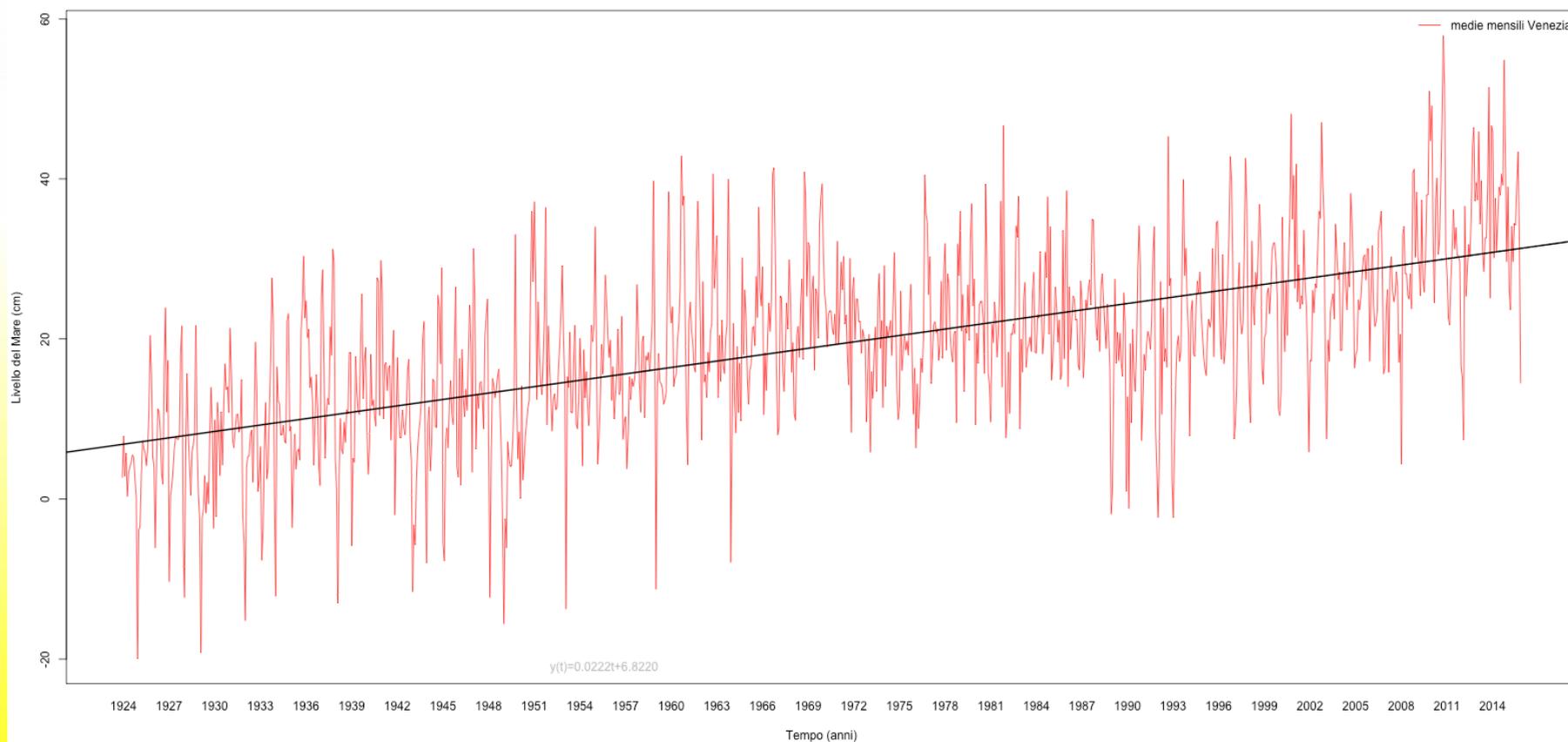
- Trend Polinomiale

$$y_t = a + bt + ct^2$$



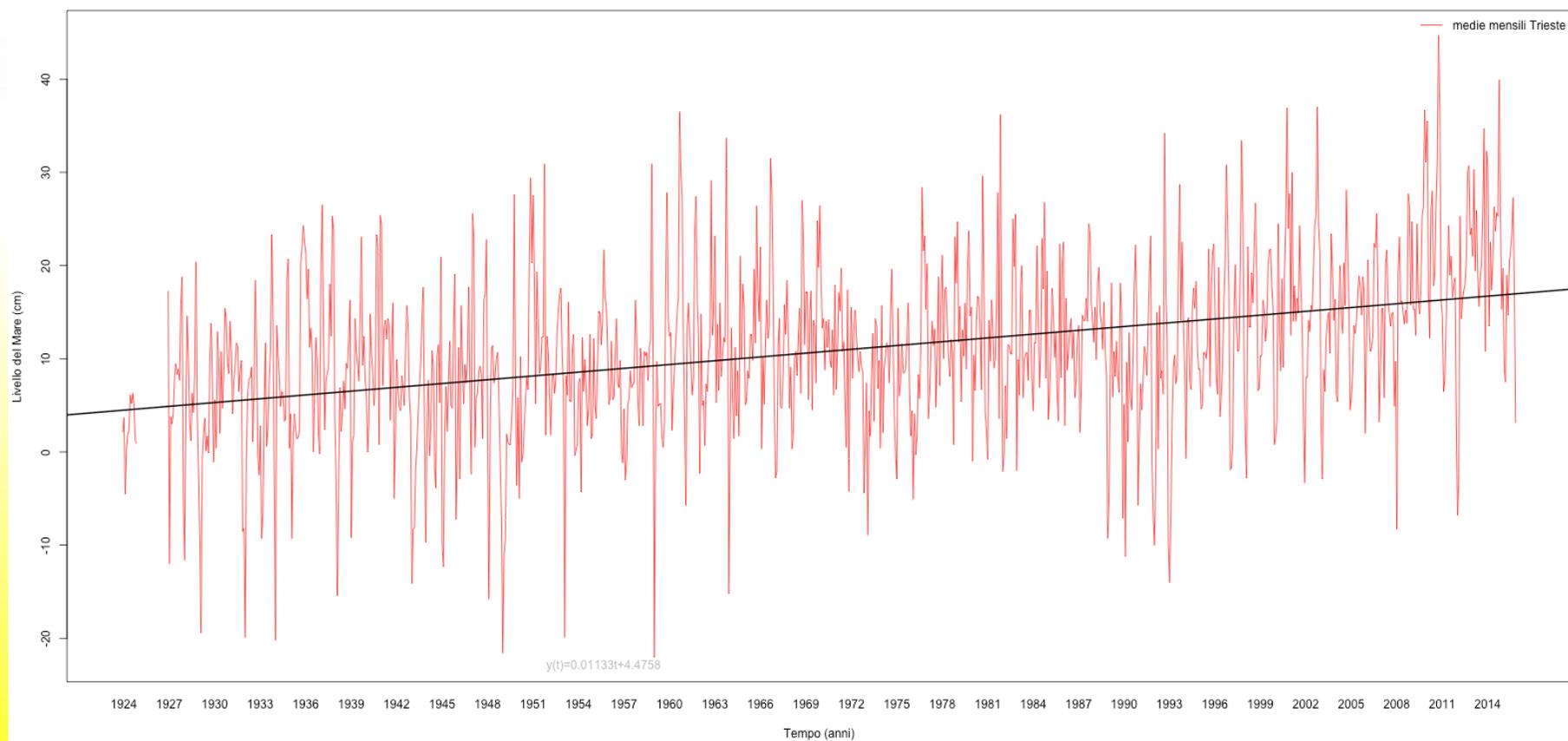
IL MODELLO LINEARE

Venezia 1924-2015



IL MODELLO LINEARE

Trieste 1924-2015



METODI DI ANALISI

Il metodo lineare consente di rispondere a queste domande

Sto variando il livello del mare?

Sto crescendo o diminuendo mediamente?

Il metodo STL ci consente di rispondere anche a questa domanda

Come sta cambiando il livello del mare?

IL MODELLO STL

Seasonal Trend decomposition using Loess

Tecnica sviluppata da Cleveland (1979) e largamente usata nell'analisi dei dati; successivamente impiegata come strumento per la decomposizione di una serie temporale nella componente stagionale e nel trend (STL – seasonal-trend decomposition using Loess) (Cleveland et al., 1990)



Local RegrESSion (LOESS)
locally weighted polynomial regression

- In ciascun punto t del subset scelto $(t-i, t+i)$ viene realizzato un fit con un polinomio di regressione locale
- Il fit è realizzato attraverso un metodo dei minimi quadrati pesato, pesando maggiormente i punti più vicini a t scelto e pesando meno i punti man mano più distanti $w(t) = (1 - |d|^3)^3$
- La procedura viene ripetuta su tutti i punti del set di dati

IL MODELLO STL

Seasonal Trend decomposition using Loess

Regressione Polinomiale Locale

- serie $Y(t)$ dipendente dal tempo
- per ogni istante t viene effettuato un fit attraverso un polinomio locale usando $Y(t)$ e le $k-1$ osservazioni adiacenti

Caso lineare

per ogni istante t si otterrà la stima di una diversa equazione di regressione locale

$$Y'(t) = a(t) + b(t)t$$

$a(t)$, $b(t)$: non si sta utilizzando una unica **globale** retta di regressione ma una serie di rette di regressione **locali**

IL MODELLO STL

Seasonal Trend decomposition using Loess

$$Y(t) = T(t) + S(t) + R(t)$$

- $T(t)$ il Trend -> variazione di lungo periodo del valore medio
- $S(t)$ la componente Stagionale -> variazione periodica, ciclica
- $R(t)$ la componente irregolare -> segnale residuo

IL MODELLO STL

Seasonal Trend decomposition using Loess

decomposizione di una serie temporale

- Sia $Y(t)$ l'osservazione al tempo t : $Y(t) = T(t) + S(t) + R(t)$
- Lo scopo è di sostituire il valore $Y(t)$ con un nuovo valore $Y'(t)$ che contenga solamente $T(t)$ e $S(t)$
- La stima di $Y'(t)$ viene realizzata a partire dalle osservazioni attorno ad $Y(t)$



MODELLO STL

IL MODELLO STL

Seasonal Trend decomposition using Loess

parametri presenti nel metodo STL: **finestra temporale**



- grande da garantire la stazionarietà delle componenti stagionali
- piccola da poter garantire una affidabilità del metodo più puntuale possibile

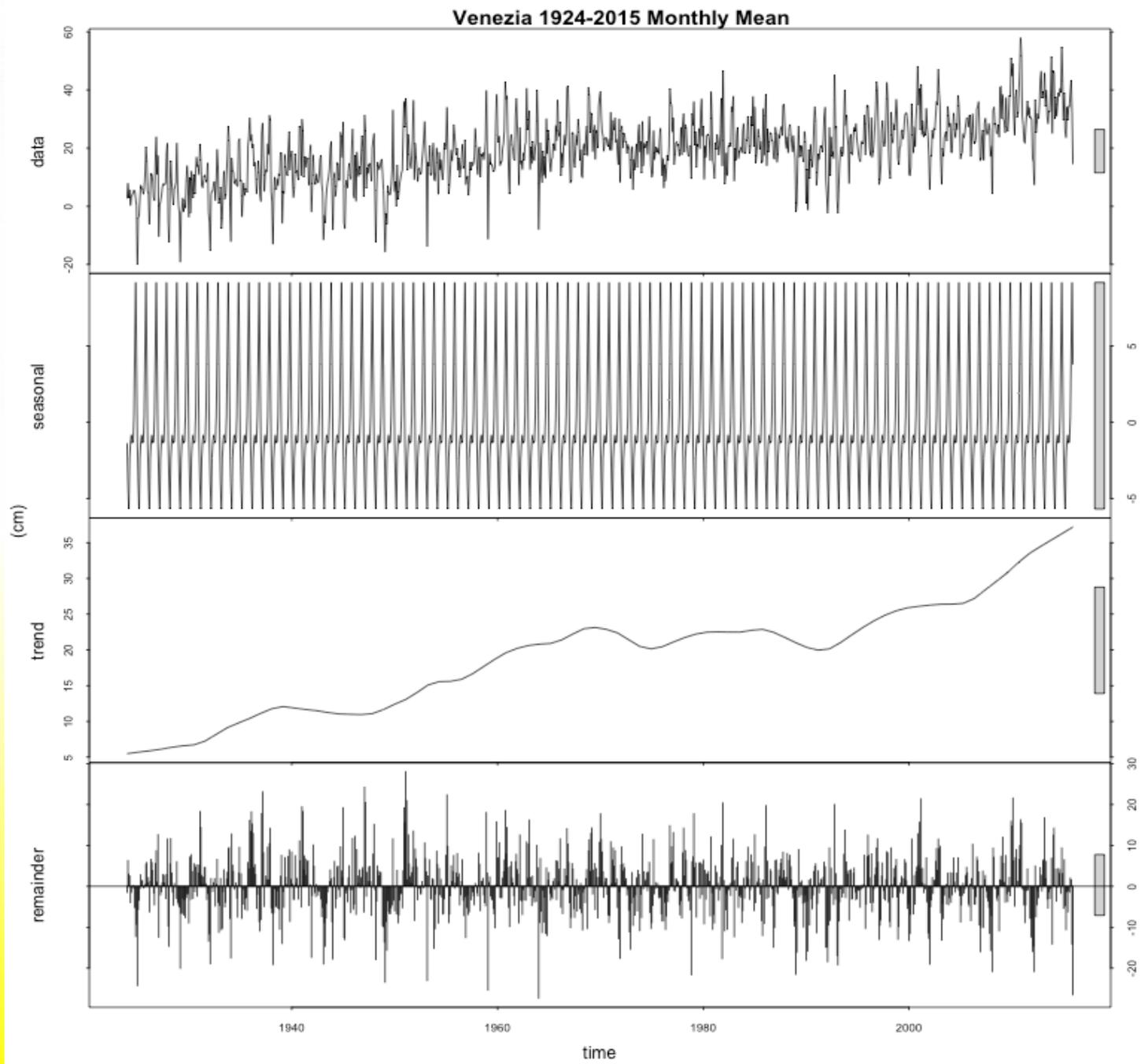
IL MODELLO STL

Seasonal Trend decomposition using Loess

- 1) Decomposizione della serie nella componente Trend, Stagionale e random utilizzando LOESS
- 2) La componente $S(t)$ viene calcolata applicando il loess alla sottoserie stagionale (es. serie dei valori di tutti i Gennaio)
- 3) Questa componente $S(t)$ viene sottratta dalla serie di origine $Y'(t) = Y(t) - S(t)$
- 4) A questa serie $Y'(t)$, viene applicato il loess per trovare la componente di trend
- 5) Questa procedura viene iterata riapplicando lo smoother per aggiornare ad ogni passo la componente stagionale, successivamente quella di trend fino alla convergenza



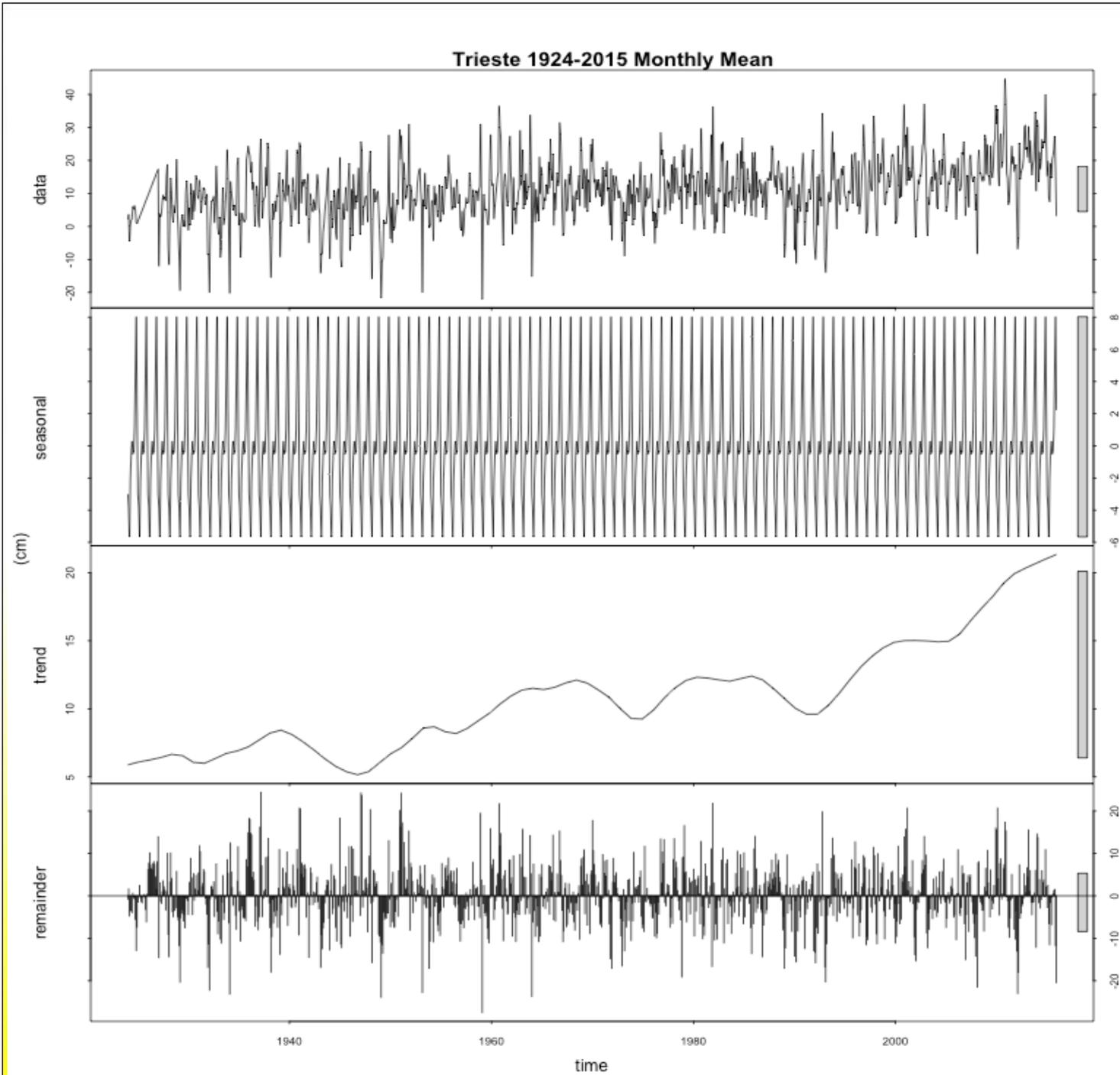
ISPRA



Venezia 1924-2015
n=121



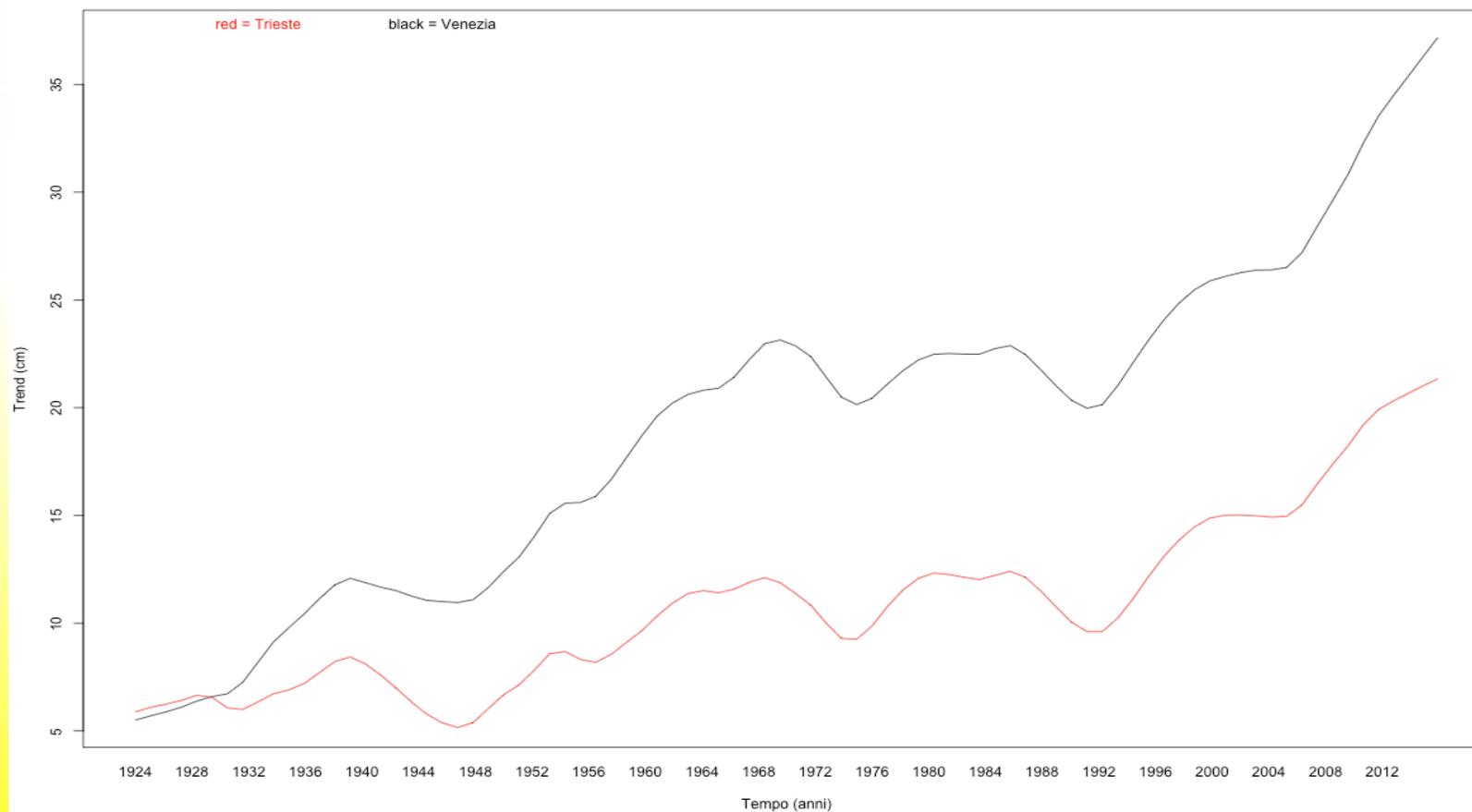
ISPRA



Trieste 1924-2015
n=121

IL MODELLO STL VENEZIA e TRIESTE

Trend Venezia - Trieste 1924-2015



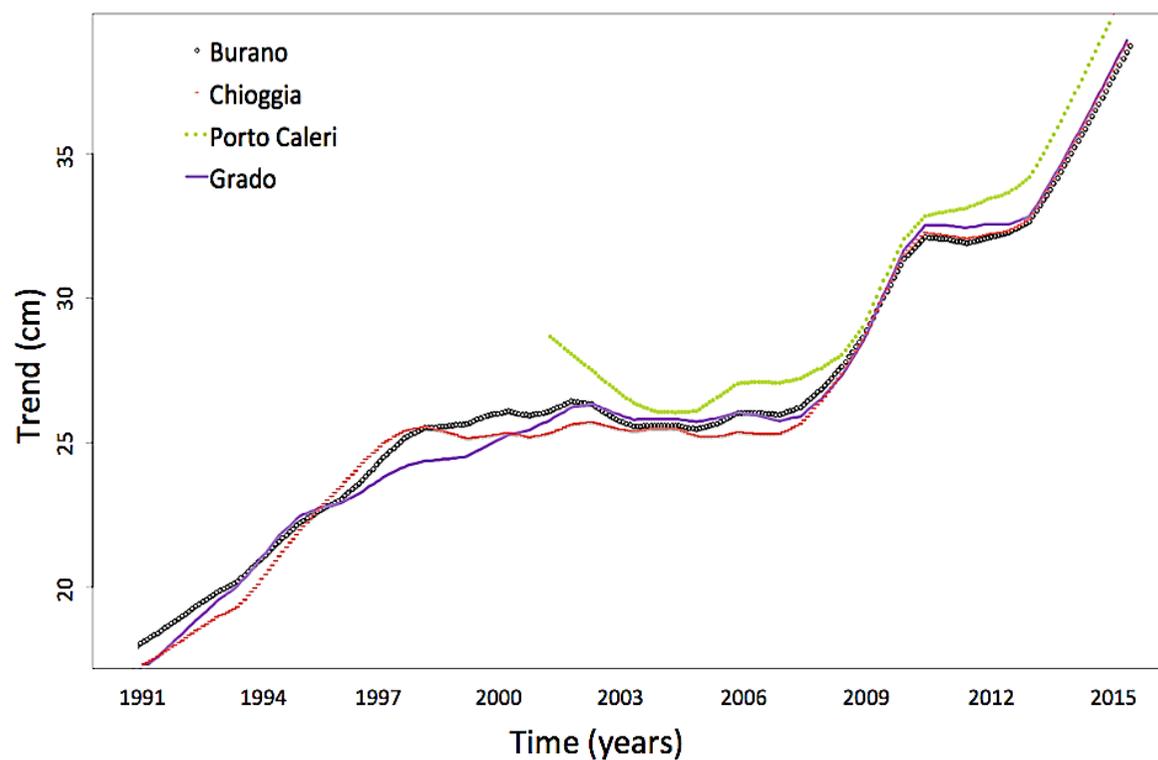
IL MODELLO STL VENEZIA e TRIESTE

Trend Venezia - Trieste 1924-2015 (trend a 17 anni)



IL MODELLO STL – LAGUNA di VENEZIA

Trend Tide Gauges North Adriatic 1991-2015



Introduzione

- **Il livello del mare e la variazione di lungo periodo**

L'ALTO ADRIATICO E LA LAGUNA DI VENEZIA

Osservazioni:

- Reti di monitoraggio
- I dati

- **Il Modello STL**

- Il modello Seasonal Trend decomposition using Loess (STL)

- **Stagionalità**

- **Risultati**

STAGIONALITÀ

È stato definito un “indicatore” di variabilità stagionale

- Le quattro componenti stagionali identificate secondo la classificazione WMO

inverno = dicembre+gennaio+febbraio

primavera = marzo+aprile+maggio

estate = giugno+luglio+agosto

autunno = settembre+ottobre+novembre

- Calcolo del valore medio annuale di ciascuna stagione
- Calcolo delle medie mobili su una finestra di 11 anni, per ridurre la variabilità delle serie stagionali
- Normalizzazione delle serie secondo la formula (caso dell'Autunno)

$$\text{Tau} = \mu_{au} / \Sigma(\mu_{au} + \mu_{wi} + \mu_{sp} + \mu_{su})$$

Tau -> indicatore del trend della stagione autunnale

μ_{au} -> media mobile sulla serie dei valori medi annuali dell'autunno

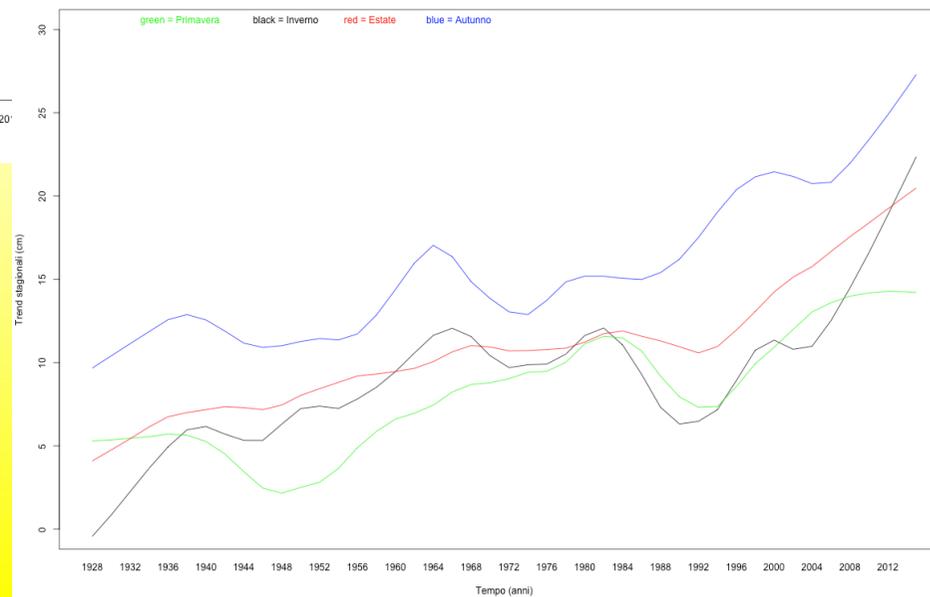
$\Sigma(\mu_{au} + \mu_{wi} + \mu_{sp} + \mu_{su})$ -> somma delle medie mobili di ciascuna stagione

STAGIONALITÀ STL

Venezia Trend Stagionali 1925-2015

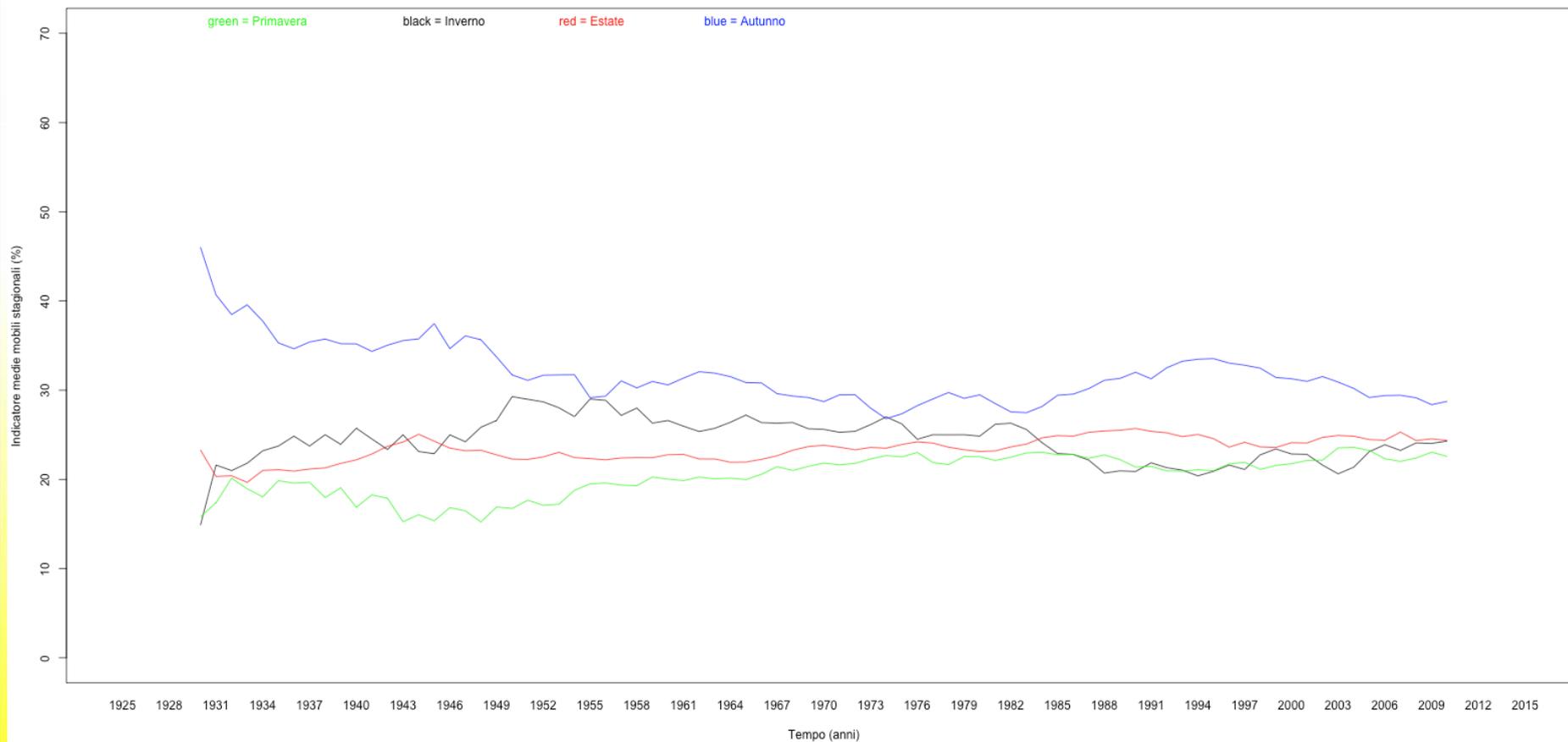


Trieste Trend Stagionali 1928-2015



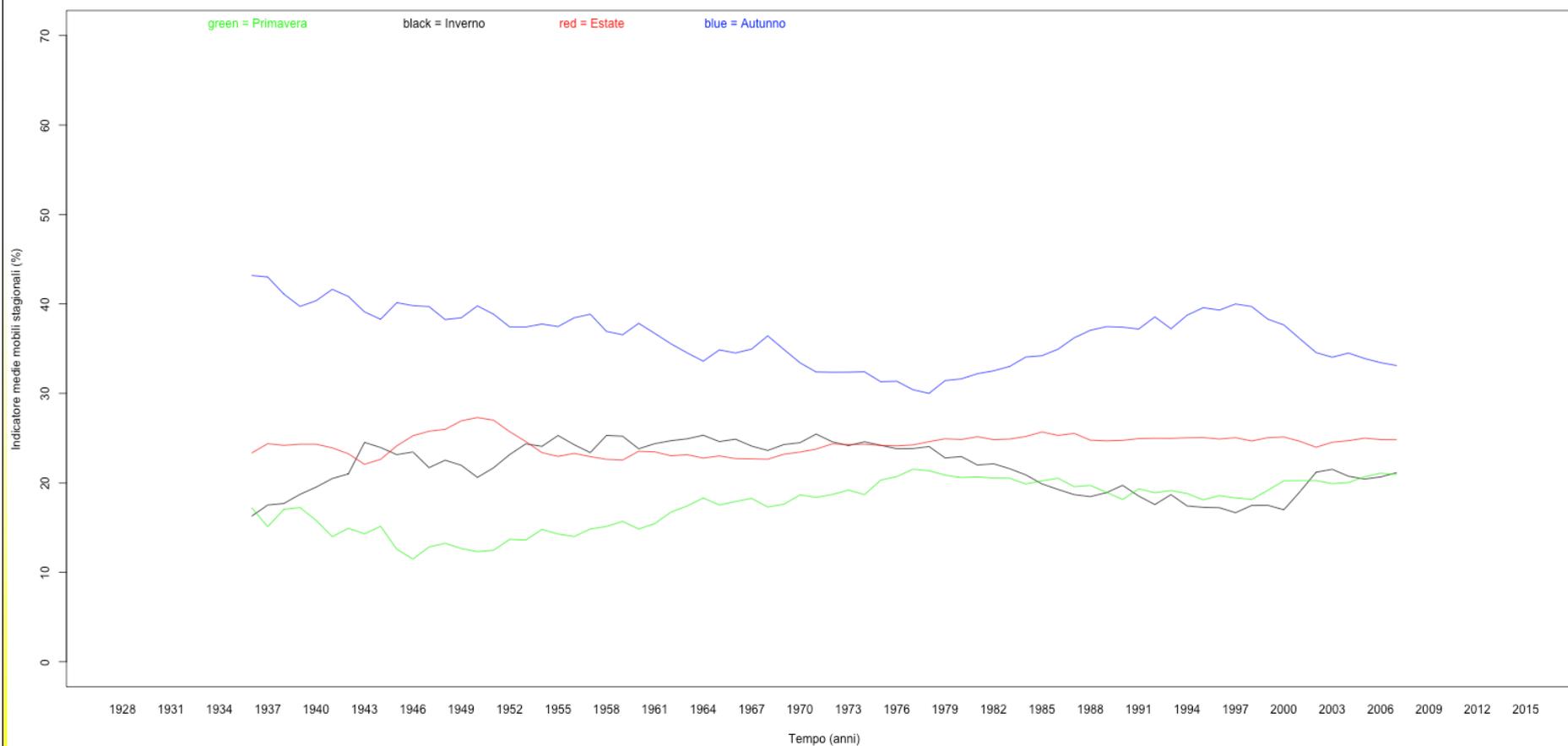
STAGIONALITÀ VENEZIA

Venezia Indicatore Medie Mobili Stagionali 1925-2015

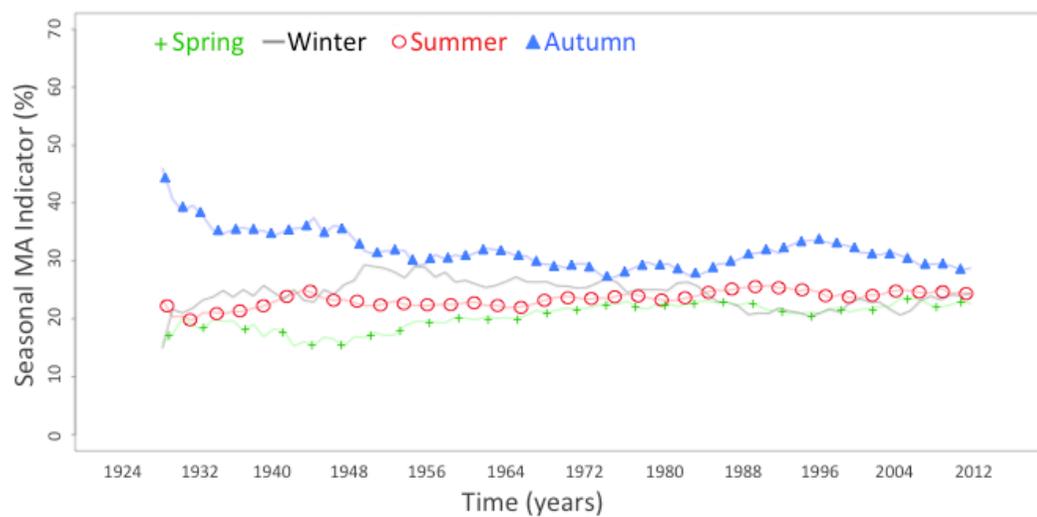


STAGIONALITÀ TRIESTE

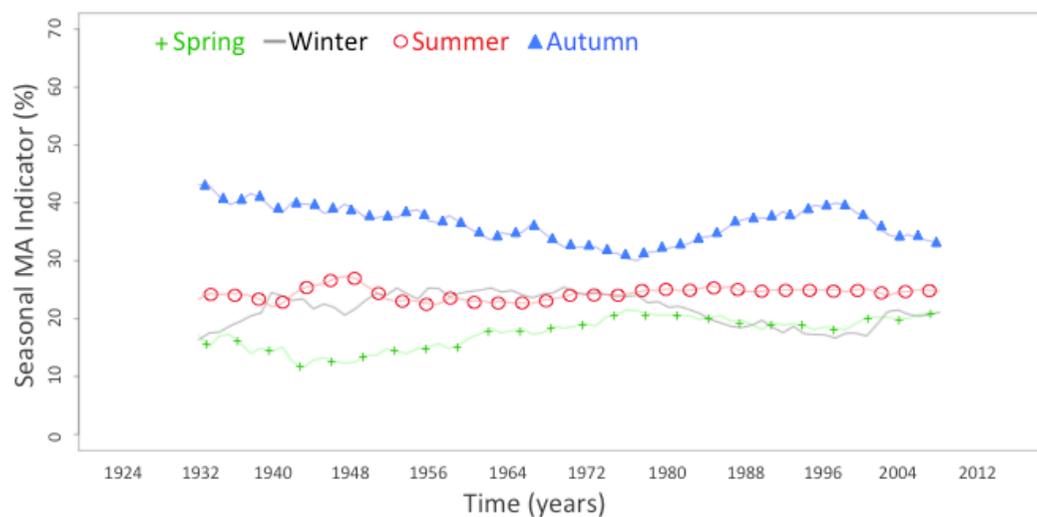
Trieste Indicatore Medie Mobili Stagionali 1928-2015



Seasonal Trend Venezia 1925-2015



Seasonal Trend Trieste 1928-2015



RISULTATI

- **Aumento del livello del mare nei 92 anni (1924-2015)**
- **Come è aumentato?**
 - Una modulazione singolare è evidente nel decennio 1986-1996 a Venezia e Trieste
 - I diversi punti di controllo mostrano comportamenti molto simili, confermando che l'aumento non è dovuto a fenomeni fisici locali
- **Stagionalità**
 - “Non ci sono più le mezze stagioni“: le componenti stagionali si muovono verso un valore neutro (25%), diminuendo le loro differenze e convergendo
 - L'estate è la componente neutra, circa stazionaria per tutto il periodo
 - Autunno e inverno sono componenti in competizione mostrando un comportamento opposto
 - La primavera tende a crescere leggermente

Bibliografia

R.B. Cleveland, W.S. Cleveland, J. E. McRae, I. Terpenning, *“STL: A Seasonal – Trend Decomposition Procedure Based in Loess”*, Journal of Official Statistics, Vol. 6 N°1, 1990 pp. 3-73

M.G. Foreman, *“Manual for Tidal Heights Analysis and prediction”*, Institute of Ocean Sciences, Pacific Marine Science Report 77 – 10, 1977

M. Giorgi, C. Stocchino, *“Les constantes harmoniques de marée du port de Genes et leurs variations”*, Atti XIV Convegno dell’Associazione Geofisica Italiana, 1965 pp. 310-324

C. Lusetti, *“Osservazioni mareografiche del Porto di Genova”*, F.C. 1079, Istituto Idrografico della Marina, 1977 pp. 35

C. Lusetti, *“Correlazione fra alcuni elementi meteorologici e il livello medio del mare a Genova”*, Istituto Idrografico della Marina, 1978 pp. 23

C. Lusetti, *“Evidenza della marea polare nel porto di Genova”*, F.C. 1120, Istituto Idrografico della Marina, 1985 pp. 12

IOC, Manual on Sea level, *“Measurements and Interpretation”*, Vol IV, 2006 pp.28 – 34

L. Papa, *“Analisi delle maree e costanti armoniche di Genova”*, F.C. 1058, Istituto Idrografico della Marina, 1974 pp. 16

L. Papa, *“A statistical investigation of low-frequency sea level variations at Genoa”*, F.C. 1087, Istituto Idrografico della Marina, 1978 pp. 13

D. T. Pugh, *“Tides, Surges and Mean Sea Level”*, John Wiley, Chichester, 1982 pp. 472

C. Stocchino, V. Scotto, *“Il livello marino e la pressione atmosferica nel porto di Genova”*, Bull. Inst. Océanogr. Monaco, Vol. 69, N° 1399, 1970 pp. 10



GRAZIE PER L'ATTENZIONE,

Dott.ssa SARA MORUCCI

Ente Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca
Ambientale (ISPRA)

Telefono 0650075226

E-mail sara.morucci@isprambiente.it