



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale **Ingegneria Civile**

ANALISI DI LUNGO PERIODO DEI RESIDUI DI MAREA NEL SITO DI ANCONA

LONG-TERM ANALYSIS OF TIDAL RESIDUALS AT THE ANCONA SITE

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. **Corvaro Sara**

Correlatori:

Ing. **Marini Francesco**

Dott. Ing. **Lorenzoni Carlo**

Tesi di Laurea di:

Salvi Ilaria

A.A. 2020 / 2021

INDICE

1 INTRODUZIONE	3
2 LA MAREA	5
2.1 MAREA METEREologica	10
2.2 ANALISI E PREVISIONE DI MAREA.....	12
2.3 ANALISI DEI RESIDUI	15
3 SERVIZIO MAREOGRAFICO NAZIONALE	17
3.1 STRUMENTI PER LA MISURA DEL LIVELLO DEL MARE	20
3.2 STRUMENTI DI MISURA DELLA RETE MAREOGRAFICA PER IL SITO DI ANCONA	22
3.2 LE TAVOLE DI MAREA.....	24
4. RICOSTRUZIONE MAREA ASTRONOMICA.....	27
4.1 RIMOZIONE OUTLIER	35
4.2 ANALISI STATISTICHE	36
4.3 ANALISI DEI RESIDUI	38
4.4 ANALISI DEI RESIDUI POT	40
4.5 EVENTI DI MAREGGIATA	54
5. CONSIDERAZIONI FINALI.....	64
6. BIBLIOGRAFIA.....	66

1 INTRODUZIONE

Il lavoro svolto in questa tesi di laurea, verte sull'analisi dei livelli marini registrati dal mareografo di Ancona, in particolare sull'analisi di lungo periodo dei residui di marea. Lo studio di tale fenomeno acquista importanza soprattutto nei paraggi in cui si hanno variazioni di rilievo del livello idrico medio.

L'obiettivo della tesi è studiare il sovrizzo di tempesta, cioè la componente di marea meteorologica, che si ottiene andando a sottrarre alla misura dei livelli idrici registrati da un mareografo la parte di marea astronomica sito specifica. L'analisi di lungo periodo dei residui di marea (sovrizzo di tempesta) permette di tenere in conto, nella progettazione di un'opera di difesa della costa o di una diga portuale, non solo dell'altezza d'onda di progetto, ma anche del sovrizzo associato.

Partendo dallo studio dei livelli idrici registrati da un mareografo, si è valutato come il livello del mare possa essere influenzato, oltre che dalla marea astronomica, dai fattori meteorologici come la pressione atmosferica e il vento.

In un primo momento si è ricostruita la marea astronomica, poi, confrontandola con i dati registrati dal mareografo, che sono la somma della marea astronomica più la marea meteorologica, si è potuto valutare l'entità del sovrizzo di tempesta attraverso una semplice sottrazione (residui di marea).

Successivamente è stata eseguita una analisi di lungo periodo su tutti gli eventi registrati e un'analisi di tipo POT (di picco sopra una certa soglia) dei residui di marea. Lo studio si è quindi focalizzato sulla determinazione di una soglia minima ideale, in modo tale da poter avere un campione con almeno due eventi per ogni anno analizzato. Le soglie prese in considerazione sono state tre: 0,35 m, 0,40 m e 0,50 m; per tutte sono state ricostruite le leggi di distribuzione di Gumbel e di Weibull, in modo tale da poter trovare quella che meglio si adattava alla serie di dati considerata. Per scegliere la legge di distribuzione che meglio si adatta al campione si è eseguito il test di adattamento di Pearson e, inoltre, si è determinato il coefficiente di determinazione.

L'analisi di lungo periodo ha permesso di ricavare, per tempi di ritorno stabiliti, l'altezza di sovrizzo ad essi associata, così da poterne tener conto in fase progettuale.

L'attenzione è stata rivolta allo studio dei livelli idrici nel Mare Adriatico, in quanto in questo bacino si hanno delle condizioni favorevoli a variazioni della superficie marina piuttosto elevate, soprattutto nella parte centro-settentrionale.

Infine, i residui di marea ottenuti dall'analisi, sono stati confrontati con i dati riferiti alle mareggiate in occasione degli eventi in cui si sono registrate maree eccezionali all'interno del periodo considerato (2010-2019).

2 LA MAREA

Le maree sono periodici movimenti di innalzamento e abbassamento della superficie del mare causati dall'attrazione del Sole e della Luna sulle masse d'acqua presenti sulla Terra e, secondariamente, influenzati dalle perturbazioni meteorologiche. La fase di innalzamento raggiunge il suo culmine nel momento di massima elevazione del livello marino, detta alta marea, mentre la fase di abbassamento termina con la minima elevazione della superficie marina, detta bassa marea. La differenza tra alta e bassa marea viene definita ampiezza di marea. Le maree sono le onde più lunghe avendo un periodo di 24 ore e 50 minuti ed una lunghezza pari alla metà della lunghezza della circonferenza terrestre. In base alla loro periodicità si possono classificare come: maree diurne, quando si verifica una alta e bassa marea al giorno; maree semidiurne, quando si verificano due alte e due basse maree al giorno di ampiezza poco diversa; maree miste, quando si verificano due alte e due basse maree al giorno di ampiezza diversa.

La marea registrata in una certa località è sempre data dalla somma di due fattori: la componente astronomica e quella meteorologica. L'oscillazione quotidiana delle masse d'acqua marine sotto l'influenza della forza gravitazionale del sistema Terra-Luna-Sole viene definita marea astronomica. Essa determina variazioni in altezza sui livelli in mare aperto, sulle coste e sui tratti terminali dei fiumi. Le escursioni mareali variano nel tempo in funzione della posizione relativa del sistema Terra-Sole-Luna e nello spazio, in funzione di caratteristiche morfologiche quali la profondità dei fondali marini, la forma delle coste e la superficie della massa d'acqua. Le maree nel Mar Mediterraneo hanno una frequenza di 12 ore circa, legate al passaggio della Luna al di sopra di un punto di osservazione sulla Terra. La marea viene influenzata in maniera diversa nel corso del mese a seconda delle fasi lunari; le escursioni massime, chiamate maree primaverili, si verificano pochi giorni dopo le lune nuove e le lune piene (sizigia, quando la luna, la terra e il sole sono allineate), mentre le escursioni minime chiamate maree di quadratura, si verificano poco dopo i tempi del primo e dell'ultimo quarto (quadratura lunare).

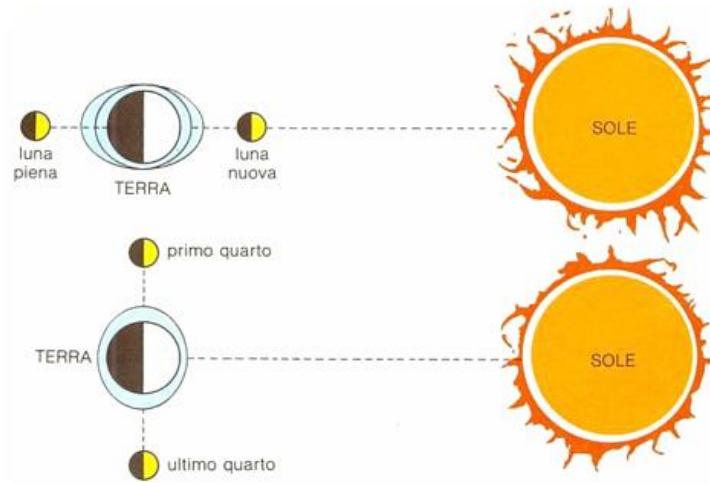


Figura 1- Sizie e Quadrature nel sistema Terra-Luna-Sole

La relazione tra gli intervalli di marea e la fase lunare è dovuta all'ulteriore attrazione di marea del sole, che rafforza le maree lunari in sizigia, ma le riduce in quadratura. La figura sottostante, mostra che quando la luna è alla sua massima distanza dalla terra, nota come apogeo lunare, le maree semidiurne sono inferiori rispetto a quando la luna è al suo massimo avvicinamento, noto come perigeo lunare. Questo ciclo nei movimenti della luna si ripete ogni 27,55 giorni solari. Gli intervalli semidiurni massimi si verificano quando le maree primaverili (sizigia) coincidono con il perigeo lunare, mentre gli intervalli semidiurni minimi si verificano quando le maree di quadratura coincidono con l'apogeo lunare.

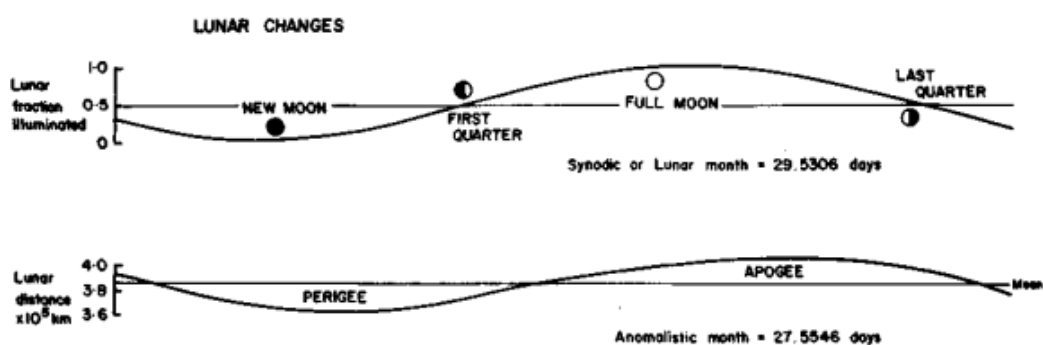


Figura 2-Ciclo lunare che influenza la marea

Le escursioni di marea semidiurne aumentano e diminuiscono all'incirca allo stesso tempo ovunque, ma ci sono differenze locali significative. Le massime escursioni di marea semidiurne sono in mari semichiusi.

Nella Baia di Fundy si verificano le più alte maree della Terra grazie ad una peculiare combinazione di due fattori principali, la cosiddetta risonanza di marea, fenomeno per cui l'onda di marea viene riflessa dalla costa presente in una baia ed incontra la successiva onda di marea proveniente dall'oceano, e la particolare forma ad imbuto e lunghezza di questa baia, che si stringe progressivamente da ovest verso est. Le maree semidiurne del Nord Atlantico hanno un'escursione media primaverile di 12.9 m, ogni giorno si verificano due picchi di alta e bassa marea e per assistere ad un ciclo completo di innalzamento o abbassamento del livello del mare servono 6 ore 12 minuti e 30 secondi. Il mare è in grado di crescere e di ritirarsi creando dislivelli di quasi 20 m, spostando circa 115 miliardi di tonnellate d'acqua.



Figura 3- Canada, Baia di Fundy

A Mont-Saint-Michel si verificano le alte maree sizigiali dell'Europa Continentale che arrivano a 15 m di altezza, che a causa dell'andamento piatto, montano con una grande rapidità (si dice con una velocità di un cavallo al galoppo); con la bassa marea il mare è a 15 km dalla costa, mentre con l'alta marea la piana intorno alla rocca si allaga lasciando in superficie solo il sottile camminamento per raggiungere l'abbazia. A causa delle correnti proveniente dalla Manica questo evento si verifica due volte al giorno, una volta alle 11 di mattina e una volta dopo le 23.



Figura 4- Mont-Saint-Michel alta marea

Il bacino del Mediterraneo, con la sua conformazione stretta ed allungata, risulta un bacino semichiuso, con bassi fondali, favorendo soprattutto nell'Adriatico settentrionale, la massima esaltazione della marea che raggiunge un'altezza massima di circa due metri. La propagazione dell'onda di mare nell'Adriatico avviene attorno ad un punto detto anfidromico, in cui l'ampiezza della marea è nulla, tale punto è situato a metà tra Ancona e Zara. Quando la marea entra nel canale di Otranto, percorre il mare Adriatico in senso antiorario con una velocità di propagazione di circa 130 km/h; dapprima risale la costa balcanica dalla Dalmazia in direzione nord, successivamente ruota in senso est-ovest verso Venezia ed infine percorre la costa italiana verso Ancona e completa il suo ciclo ad Otranto, dopo 12 ore e 24 minuti. Questa rotazione viene detta "anfidromica" perché deriva dalla composizione degli effetti di una oscillazione longitudinale della marea, con una oscillazione trasversale che si sviluppa nel mare a causa della rotazione terrestre.

Ad esempio nell'Adriatico un sito oggetto di studi a causa di maree è la Laguna di Venezia.

La propagazione della marea all'interno della laguna ha una direzione da nord-est a sud-ovest con un ritardo molto contenuto, l'escursione media è dell'ordine di ± 60 cm. Gli eventi di marea che superano gli 80 cm sullo zero mareografico vengono denominati eventi di acqua alta; mentre si classificano come eventi di acque alte eccezionali le maree il cui colmo supera il livello di 140 cm.



Figura 5- Piazza San Marco di Venezia

2.1 MAREA METEOROLOGICA

I livelli della marea sono inoltre influenzati da fattori meteorologici, tra i quali, i più rilevanti sono le variazioni di pressione atmosferica ed il vento.

La pressione atmosferica è data dalla forza che le masse d'aria esercitano sulla superficie terrestre, pertanto, la sua azione si estende anche sui mari e sugli oceani, comprimendoli in relazione alla sua intensità. Il livello dell'acqua non si adegua immediatamente ad una variazione di pressione; in particolare, dove l'atmosfera preme di meno (bassa pressione) il mare tenderà a sollevarsi, quindi un'area di bassa pressione sul Nord Adriatico, a una di alta al Sud, provocano un effetto di spostamento della massa d'acqua nella direzione della pressione atmosferica minore. La variazione è di circa 1 cm per ogni millibar di variazione di pressione, si può arrivare fino a 30 cm al passaggio di una perturbazione.

L'effetto del vento invece risulta più complesso e dipende dalla sua forza, direzione e durata, e dalla forma e dall'estensione del bacino su cui insiste: il vento tende a spingere le acque nel proprio verso di propagazione. Nel caso del mare Adriatico, bacino lungo e stretto, chiuso nel lato superiore ed aperto in quello inferiore, un forte vento che soffia da sudest, lo scirocco, lungo l'asse longitudinale, produce un accumulo d'acqua verso l'estremità chiusa. Il fenomeno viene favorito dalla lunga zona d'azione disponibile per il vento denominata "fetch" ed è ulteriormente amplificato dai bassi fondali della parte settentrionale, dove in alcuni punti non si raggiungono i 50 metri. Il sovrizzo dovuto al vento può superare anche il metro e provocare da solo fenomeni di inondazioni.

Nel mare Adriatico, osservazioni hanno dimostrato che la bassa pressione non è sufficiente a determinare un evento d'acqua alta se non è accompagnato da venti di scirocco.

Inoltre, all'interno dell'Adriatico si sviluppano delle oscillazioni libere, denominate "sesse", che rappresentano la risposta del mare ad un cambiamento rapido delle forzanti meteorologiche. In pratica il passaggio di una perturbazione e il suo rapido esaurirsi agisce sulla marea con una sorta di stimolo impulsivo, lo "storm surge" (ondata di bufera), in seguito al quale l'Adriatico, a causa della forma del bacino, si comporta come una cavità risonante: al cessare dell'impulso la massa d'acqua per tornare ad una situazione di equilibrio compie una serie di oscillazioni longitudinali e trasversali, le onde "sesse" appunto, la cui ampiezza si smorza nel tempo.

L'oscillazione fondamentale, longitudinale, ha un periodo di 22 ore. Di questa componente bisogna tenere conto nella previsione di marea: accade spesso che nei giorni successivi allo storm surge, grazie allo sfasamento di quasi due ore tra la periodicità della marea astronomica (24 ore) e la sessa (22 ore), l'oscillazione possa trovarsi in fase con il massimo di marea astronomica e provocare l'acqua alta.

La somma di questi tre fenomeni fisici (pressione atmosferica, vento e storm surge) viene denominato sovrizzo di tempesta, che dà luogo ad incrementi positivi o negativi rispetto alle normali oscillazioni astronomiche.

Nella figura sottostante viene riportato un grafico, in cui si mostra la diretta correlazione tra pressione atmosferica e l'altezza del livello marino. Per fenomeni di alta pressione, il livello marino subirà una depressione che comporta una riduzione del livello medio mare fino a raggiungere picchi negativi; mentre per fenomeni di bassa pressione si avrà un innalzamento del livello marino.

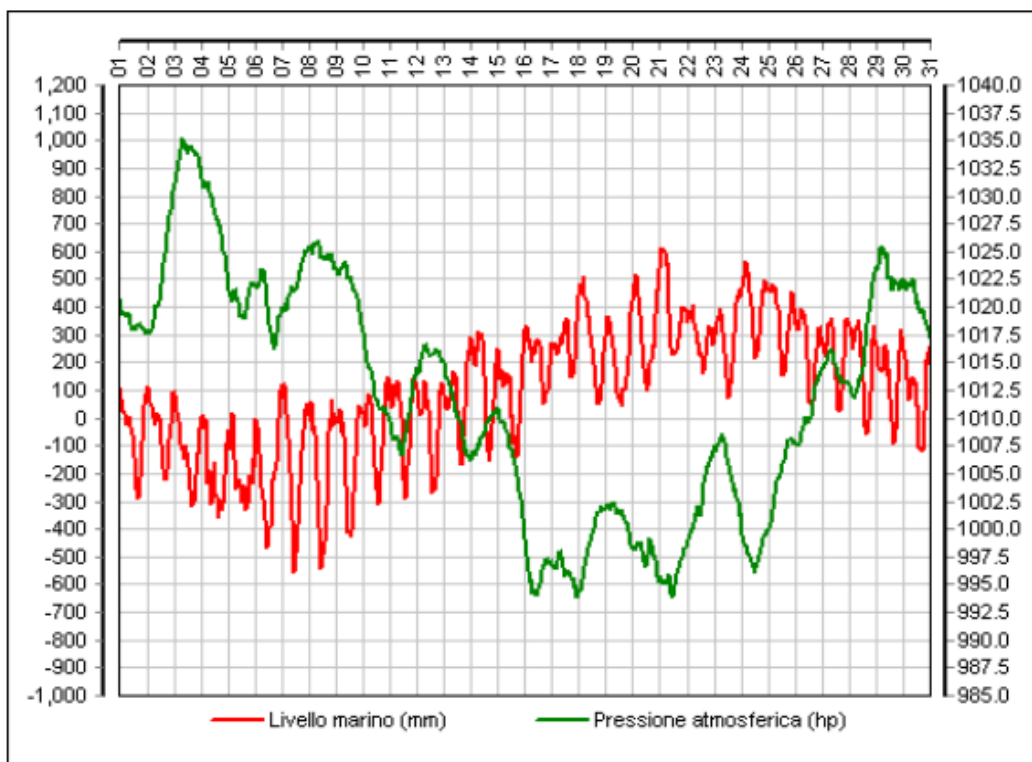


Figura 6- Rappresentazione del livello del mare e pressione atmosferica relativo evento novembre 2019

2.2 ANALISI E PREVISIONE DI MAREA

L'analisi delle maree, dei dati raccolti dalle osservazioni del livello del mare e delle correnti hanno due scopi: in primo luogo, una buona analisi fornisce la base per prevedere le maree in tempi futuri, risultando così un valido aiuto per la navigazione; inoltre i risultati dell'analisi possono essere interpretati scientificamente in termini di idrodinamica dei mari. Un'analisi fornisce parametri che possono essere mappati per descrivere le caratteristiche di marea di una certa regione.

I metodi per la previsione delle maree possono essere classificati come armonici o non armonici. Il metodo armonico, generalmente utilizzato per previsioni e lavori scientifici, tratta la marea come la somma di un numero di costituenti armonici, chiamati costanti armoniche le cui velocità angolari e fasi sono determinate dagli argomenti astronomici; mentre il metodo non armonico consiste nel mettere in relazione i tempi e le altezze dell'acque bassa e alta direttamente alle fasi lunari e ad altri parametri astronomici.

Le costanti armoniche possono essere calcolate solo attraverso l'analisi dei dati di marea raccolti in un luogo. Viene utilizzato un minimo di 30 giorni di dati per osservare la maggior parte dei cicli lunari e solari. È necessario un anno di dati per osservare direttamente tutti i costituenti armonici di marea. Le stazioni che dispongono di serie di dati più lunghe utilizzano in genere costanti armoniche ottenute dall'analisi su più anni.

Ogni componente armonica di marea, individuata univocamente dalla sua frequenza o dal suo periodo, ha una nomenclatura, cioè una sigla che ne ricorda l'origine e un pedice che indica il numero approssimativo di cicli al giorno (1 se la componente ha un ciclo diurno e 2 se la componente ha un ciclo semidiurno). Le componenti principali sono sette e sono: M2 componente lunare semidiurna principale; S2 componente solare semidiurna principale; K1 componente lunisolare declinazionale diurna; O1 componente lunare diurna principale; P1 componente solare diurna principale e N2 componente lunare semidiurna ellittica maggiore. I valori delle costanti armoniche risultano diversi da luogo a luogo, ma si mantengono, per uno stesso posto, costanti nel tempo.

L'andamento dell'onda di marea complessiva nel tempo $H(t)$ può essere rappresentata come somma di armoniche dalla formula:

$$H(t) = A_0 + \sum_{i=1}^k f A_i \cos[\omega t + (v_0 + u) - G]$$

dove:

- A_0 , altezza media del livello d'acqua;
- A_i , ampiezza media di qualsiasi costituente;
- f , fattore nodale tiene conto delle variazioni di lungo periodo;
- ω , velocità della costituente;
- $(v_0 + u)$, argomento astronomico;
- t , tempo;
- G , fase del costituente o epoca κ .

Nella formula precedente tutte le quantità (tranne t) possono essere considerate costanti per ogni anno e posto, e quando queste costanti sono note si può determinare l'altezza della marea per ogni istante di tempo t .

La costante A_0 è il livello medio del mare. Il dato delle previsioni può essere scelto più o meno arbitrariamente, ma è consuetudine utilizzare il dato di bassa marea che è stato adottato come riferimento per i sondaggi sulle carte idrografiche della località.

Le costanti A_i e G , caratteristiche di ogni componente per ogni sito, si ricavano dall'analisi armonica dei mareogrammi registrati in tale sito e possono essere leggermente modificate da un'osservazione più accurata dei cambiamenti delle condizioni fisiche della località (come può verificarsi dal dragaggio, dal deposito di sedimenti o da altre cause).

Il fattore nodale f varia anno per anno e viene introdotto per ridurre l'ampiezza reale in funzione della longitudine rispetto al nodo lunare; ad ogni armonica costituente associato un valore di f , indipendentemente dalla località.

La quantità ω è la velocità angolare di qualsiasi costituente per unità di tempo; i valori delle velocità dei diversi costituenti sono calcolati da dati astronomici mediante formule derivate

dallo sviluppo della forza di marea e sono costanti per tutti i tempi e i luoghi. Sia la velocità angolare che la fase vanno espressi in radianti.

La quantità $(v_0 + u)$ è diversa per ogni costituente e per ogni epoca; v_0 è una parte uniformemente variabile dell'argomento dell'equilibrio e fa riferimento all'inizio di ogni anno, mentre u è una parte variabile molto lenta dovuta ai cambiamenti nel nodo della luna, ed è referenziato all'inizio di ogni anno e si presume sia costante durante tutto l'anno.

Lo sfasamento si riferisce al momento in cui la luna passa direttamente sopra la posizione esatta della stazione di marea; quando l'epoca è data in termini di meridiano locale, di solito si chiama κ' , quando invece fa riferimento al meridiano di Greenwich si chiama G .

2.3 ANALISI DEI RESIDUI

Le maree sono dei movimenti periodici, direttamente correlati in ampiezza e fase a delle forze geofisiche periodiche. Le maree chiamate gravitazionali sono quelle causate dai movimenti regolari dei sistemi Luna-Terra e Terra-Sole; mentre le maree meteorologiche o regolari, che si verificano nel giorno solare, sono quelle causate dalle variazioni stagionali dei livelli e della circolazione dell'acqua marina dovute alle variazioni del clima.

Qualsiasi sequenza di misurazioni del livello del mare avrà una componente di marea e una componente non di marea. La componente non di marea che rimane dopo l'analisi che ha rimosso le maree regolari è chiamata residuo.

Eeguire l'analisi dei residui è molto importante per comprendere lo sviluppo dei picchi, l'interazione dei picchi di marea e le statistiche del verificarsi dei picchi su lunghe scale temporali; quindi è possibile fornire stime migliori del livello estremo del mare da utilizzare nella difesa costiera.

Supponiamo che la linea continua rappresenti il livello del mare osservato (O), la linea tratteggiata rappresenti le previsioni di marea dal metodo armonico (T) e che la linea tratteggiata rappresenti il residuo ottenuto per sottrazione (R).

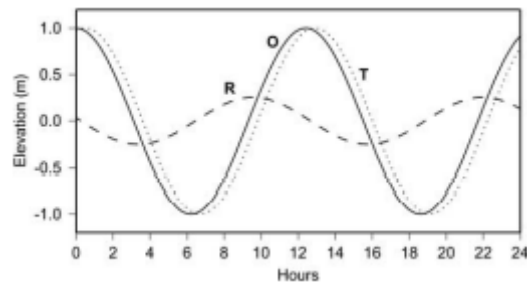


Figura 7- Residuo per cambiamento di fase

Da delle analisi eseguite si riscontrano delle caratteristiche che derivano dall'interazione marea-surge, dove con il termine surge si indica il contributo meteorologico al livello del mare. Poiché il passaggio dei sistemi meteorologici è indipendente dalla marea, se il livello del mare fosse semplicemente una sovrapposizione lineare di marea e surge, allora il picco residuo potrebbe verificarsi in qualsiasi momento rispetto all'acqua alta (le distribuzioni sarebbero casuali).

Esistono diversi tipi di residuo: per cambiamento di fase, per acqua alta, per acqua bassa e per lunga durata. Nella figura sottostante vengono rappresentati i residui, in sequenza come prima descritti.

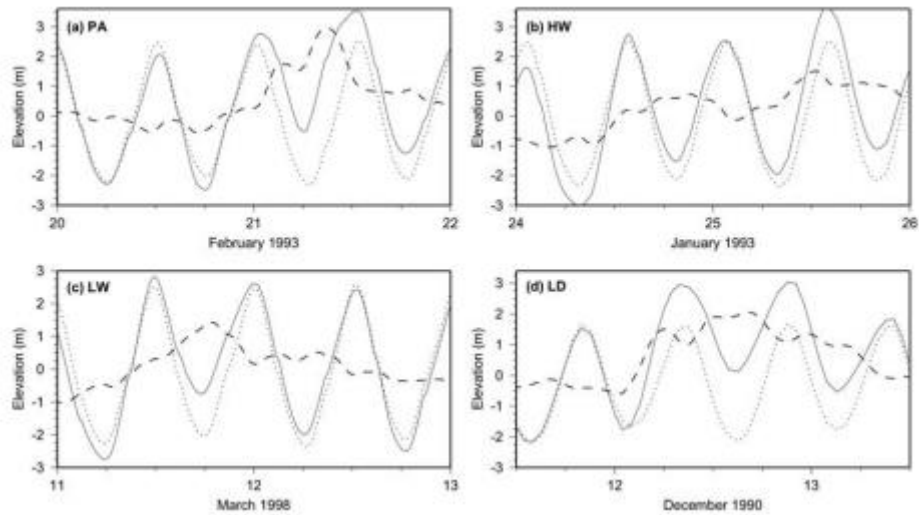


Figura 8- Vari residui

Nel esempio della figura 8 (evento del febbraio 2013), si può pensare che la marea arrivi prima a causa di effetti metereologici, anche se non vi è un cambiamento nell'ampiezza della curva del livello del mare; quindi un residuo si ottiene attraverso il solo cambio di fase. I picchi maggiori si riscontrano solo intorno a 3-5 ore prima dell'arrivo dell'acqua alta; inoltre l'aumento dell'escursione di marea sembra ridurre il rischio di picchi residui che arrivano vicino all'acqua alta.

3 SERVIZIO MAREOGRAFICO NAZIONALE

Sin dalla metà del 1800 illustri idraulici avevano constatato la necessità che fosse istituito un Servizio Idrografico a carattere nazionale che provvedesse al rilevamento delle caratteristiche dei corsi d'acqua. Tale attività non doveva essere organizzata da privati, quindi l'organizzazione del servizio fu studiata dal Consiglio Superiore delle Acque, che propose la creazione di un Servizio statale che si occupasse delle ricerche e degli studi relativi al patrimonio idrico nazionale. In seguito, con la L. 183/1989 sulla difesa del suolo, fu stabilito che i Servizi Idrografico e Mareografico fossero unificati nel Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN). Con il D.P.R. 85/1991 vennero identificati e descritti nuovi e più ampi compiti attribuiti al SIMN, tra i quali quello di dover provvedere "al rilevamento, validazione, archiviazione e pubblicazione delle grandezze climatiche, idrologiche e idrografiche interessanti il reticolo idrografico superficiale e sotterraneo, le lagune, il clima marittimo, i livelli marini ed i litorali".

Il successivo D.P.R. 106/1993 ha sancito la nascita e individuato i compiti del Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali (DSTN) nell'ambito della Presidenza del Consiglio dei Ministri, successivamente confluito presso l'"Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale" (ISPRA, istituito con la legge 133/2008); tra le proprie mansioni, quest'ultima assicura la continuità della raccolta delle osservazioni meteo-mareografiche. Da questa evenienza il Servizio Mareografico Nazionale (SMN) ha ricevuto il compito di: progettare, realizzare e gestire le reti di rilevamento mareografico e ondametrico; monitorare le caratteristiche fisiche e di qualità dei mari italiani; raccogliere, elaborare e pubblicare i dati raccolti; ed inoltre valutare le attività nel campo della misura di onde anomale. La Rete Mareografica Nazionale (RMN) è costituita da 36 stazioni di misura uniformemente distribuite sul territorio nazionale all'interno delle strutture portuali.

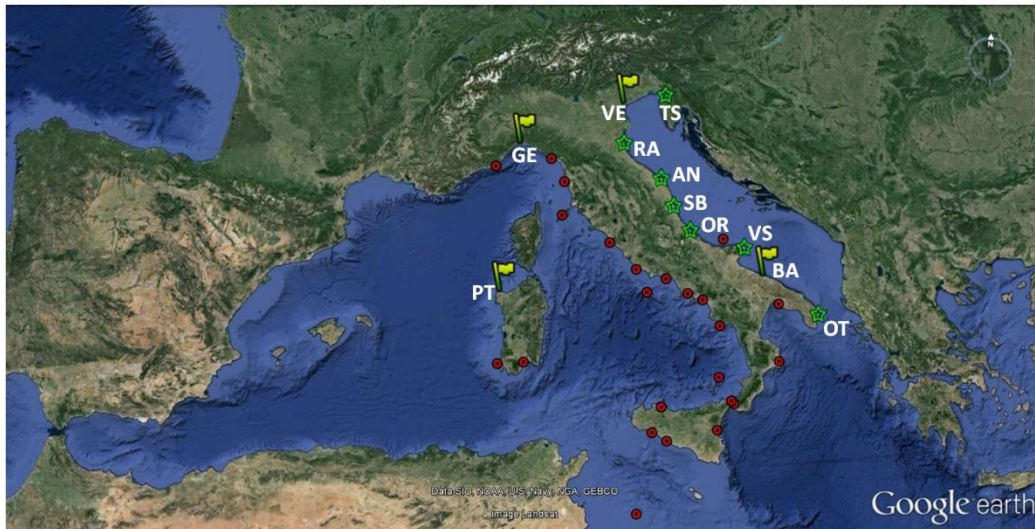


Figura 9- Rete Mareografica Nazionale

Dal gennaio del 2010 il parametro di livello idrometrico viene monitorato con un nuovo sensore di livello a microonde (radar), che viene installato in coppia con un sensore di livello a galleggiante basato su tecnologia “shaft-encoder” e inoltre è mantenuto in funzione il sensore idrometrico storico ad ultrasuoni presente nella RMN dal 1998.

Le stazioni sono dotate:

- di un sensore anemometrico per la misura del vento;
- di un sensore barometrico per la misura della pressione;
- di un sensore di temperatura dell’aria e dell’acqua;
- di un sensore di umidità relativa.

I parametri misurati sono i seguenti: temperatura dell’acqua, pH, conducibilità e redox. Tutte le stazioni sono dotate di un sistema locale di gestione e memorizzazione dei dati e di un apparato di trasmissione (UMTS) in tempo reale alla sede centrale del SMN a Roma; inoltre in 9 stazioni strategiche per la misura di fenomeni particolari (onde anomale) è presente un secondo sistema di trasmissione di dati via satellite con tecnologia IRIDIUM che garantisce il collegamento anche in presenza di situazione di black-out del sistema UMTS.

Inoltre nel 1989 è stata istituita la Rete Ondametrica Nazionale (RON), che è il sistema di rilevamento del moto ondoso dell’ISPRA, costituito da una rete di quindici stazioni di misura

in punti fissi lungo le coste nazionali per la raccolta di dati che caratterizzano lo stato di mare. I parametri descrittivi derivano dall'osservazione in continuo della variazione della superficie del mare attraverso boe ondometriche direzionali e vengono elaborati ad intervalli di tempo regolari.

3.1 STRUMENTI PER LA MISURA DEL LIVELLO DEL MARE

Il mareografo è lo strumento utilizzato per la misurazione e la registrazione delle variazioni verticali del livello del mare rispetto allo zero convenzionale mareografico, e ne stabilisce il valore medio in dato luogo e in dato periodo. Esistono due tipi principali di mareografo: a galleggiante e manometrico; nel primo caso può essere semplicemente costituito da un'asta graduata oppure da un sistema più elaborato che permette una misura continua nel tempo. Tale apparato viene solitamente realizzato tramite un galleggiante sospeso in una condotta che comunica con il bacino idrico tramite un piccolo foro, che ha lo scopo di filtrare le onde più corte; il livello ottenuto viene quindi registrato meccanicamente su un supporto cartaceo. Gli strumenti moderni sono basati su sensori elettronici e consentono di tradurre il segnale in un impulso elettrico che può essere registrato, e successivamente analizzato, in forma digitale. Un'installazione mareografica moderna risulta quindi essere costituita da: un dispositivo di registrazione dati, un sensore del livello del mare, un dispositivo di comunicazione delle letture agli utenti, un mezzo di controllo indipendente dal tempo, un dato di riferimento per la stazione, un caposaldo geodetico, ossia un'elevazione nota relativa all'altezza topografica della stazione. In generale, la registrazione ottenuta, rappresenta l'altezza del livello del mare in un dato punto di osservazione in funzione del tempo, e riferita ad un valore medio della superficie del mare, calcolato tramite osservazioni su periodi di tempo sufficientemente lunghi. L'osservazione dei variabili livelli del mare viene fatta leggendo l'altezza dell'acqua sulle aste graduate, dette scale di marea, a intervalli uniformi di tempo; i valori forniti vengono registrati formando un mareogramma.



Figura 10- Mareografo Ancona

3.2 STRUMENTI DI MISURA DELLA RETE MAREOGRAFICA PER IL SITO DI ANCONA

La stazione mareografica di Ancona (latitudine 43°37'29.16" e longitudine 13°30'23.46") è ubicata presso la darsena di S.Primiano, ed è dotata di caposaldi altimetrici riferiti al livello medio del mare misurato da Genova dall'antico mareografo Thompson. I caposaldi sono contrassegni metallici che determinano la quota altimetrica mediante livellazione di alta precisione. Dalla data del 16/10/09 il livello idrometrico viene misurato con un nuovo sensore radar denominato SIAP+MICROS TLR con precisione millimetrica; garantisce l'uniformità della misura con la serie di dati precedenti a tale data prodotti con il sensore SIAP+MICROS ID0710 basato su un trasduttore ad ultrasuoni. Il trasduttore a livello radar (TLR) genera una serie di impulsi a microonde che vengono inviati e direzionati dall'antenna del radar in direzione del livello da misurare. Le microonde riflesse vengono rilevate dall'antenna ed inviate all'elettronica, qui un miniprocesso valuta il segnale ed identifica l'eco riflesso dalla superficie determinando la distanza dall'emettitore.



Figura 11- Trasduttore di livello radar TLR

La temperatura viene misurata con un trasduttore, l'elemento sensibile è costituito da termoresistenza al platino con curva di risposta secondo norme DIN 43760 classe 1/3. Il corpo del sensore è dotato di connettore IP-67 e cavo di lunghezza L=15 m.



Figura 12- Trasduttore di temperatura

Al largo di Ancona è presente anche una boa ondometrica, le boe sono fornite di accelerometri collegati ad un pendolo che, mentre la boa si sposta, rimane sempre verticale; essendo l'accelerazione la derivata seconda dello spostamento, basta integrare due volte il valore fornito per trovare lo spostamento, quindi l'altezza dell'onda istantanea. Hanno inoltre un sistema di bussole che misurano la direzione dell'onda e un sistema radio che trasmette i dati in tempo reale.



Figura 13- Boa ondometrica

3.2 LE TAVOLE DI MAREA

Le tavole di marea preparate dall'Istituto Idrografico della Marina, sono un raggruppamento delle ore di alta e bassa marea, il calcolo viene effettuato tenendo conto delle sole componenti astronomiche principali a prescindere dalle condizioni metereologiche, ovviamente incognite a priori, che possono variare anche di molti centimetri in più o in meno rispetto al livello previsto per la marea. Tutti i porti italiani ed europei per i quali è prevista una previsione di marea sono elencati all'interno di queste tavole, alcuni sono governati dalle alte e basse maree di Gibilterra come porto di riferimento, mentre i rimanenti hanno per riferimento le maree di Venezia.

Le tavole sono divise in 6 parti rispettivamente:

- le costanti armoniche utilizzate per la previsione, per ciascun giorno dell'anno, delle ore e delle altezze delle alte e delle basse maree per i 17 porti principali italiani;
- le costanti armoniche utilizzate per la previsione, per ciascun giorno dell'anno, delle ore e delle altezze delle alte e delle basse maree per i porti campione di Gibilterra e Venezia;
- gli elementi necessari per ottenere le ore e le altezze delle alte e delle basse maree di un porto secondario da quello relativo al porto campione;
- le previsioni delle correnti di marea per alcune località italiane;
- le tavole ed il glossario;
- le tavole di pronto impiego per il calcolo speditivo della corrente di marea nello Stretto di Messina.

COSTANTI ARMONICHE

N°	Pag.	PORTO	Coordinate Geografiche		Costanti Armoniche H in centimetri – g in gradi										Z ₀ m.
			Lat. N	Long. E	M ₂	S ₂	N ₂	K ₂	K ₁	O ₁	P ₁	M ₄	MS ₄		
1	2	IMPERIA	43° 53'	8° 01'	H	8.0	3.2	1.6	0.9	3.5	1.7	1.2	0.6	0.4	0.15
					g°	266	284	258	284	206	123	206	067	131	
2	5	GENOVA	44° 24'	8° 54'	H	8.5	3.3	1.7	0.9	3.6	1.6	1.2	0.6	0.4	0.15
					g°	251	268	235	268	201	118	201	038	100	
3	8	LA SPEZIA	44° 04'	9° 51'	H	9.4	3.4	2.0	0.9	3.7	1.4	1.2	0.5	0.3	0.20
					g°	244	267	232	267	198	116	232	117	094	
4	11	LIVORNO	43° 33'	10° 18'	H	8.5	3.3	1.9	0.9	3.6	1.6	1.2	0.4	0.2	0.17
					g°	261	278	247	278	193	111	193	040	100	
5	14	CIVITAVECCHIA	42° 06'	11° 47'	H	10.9	4.1	2.3	1.1	2.7	1.2	0.9	0.4	0.2	0.20
					g°	268	289	254	289	207	118	207	232	273	
6	17	NAPOLI	40° 50'	14° 16'	H	11.4	4.3	2.3	1.2	2.8	1.0	0.9	0.4	0.2	0.20
					g°	266	287	250	287	219	125	219	208	265	
7	20	CAGLIARI	39° 12'	9° 06'	H	8.1	2.9	1.8	0.8	3.0	1.6	1.0	0.2	0.1	0.16
					g°	265	287	243	287	198	114	198	253	311	
8	23	PALERMO	38° 08'	13° 20'	H	11.2	4.3	2.2	1.2	3.0	1.0	1.0	0.4	0.3	0.21
					g°	261	283	246	283	208	126	208	190	250	
9	26	PORTO EMPEDOCLE	37° 17'	13° 32'	H	4.7	3.3	0.9	0.9	1.8	1.2	0.6	0.1	0.2	0.15
					g°	105	105	127	105	107	086	107	330	358	
10	29	MESSINA	38° 11'	15° 34'	H	5.3	2.8	0.8	0.7	0.9	1.0	0.3	1.4	1.2	0.12
					g°	031	056	008	056	290	065	290	312	338	
11	32	TARANTO	40° 28'	17° 13'	H	6.5	3.7	0.6	1.2	1.8	0.8	0.7	-	-	0.12
					g°	100	103	112	109	57	48	48	-	-	
12	35	BRINDISI	40° 39'	17° 58'	H	8.7	5.2	1.4	1.4	4.6	1.5	1.5	0.2	0.1	0.15
					g°	102	111	099	111	069	057	069	194	059	
13	38	ANCONA	43° 37'	13° 30'	H	6.6	3.5	1.2	1.0	13.2	4.1	4.4	-	-	0.30
					g°	332	347	326	347	88	74	88	-	-	
14	41	RAVENNA	44° 30'	12° 17'	H	15.5	9.1	3.0	2.5	15.9	5.0	5.3	0.3	0.3	0.40
					g°	303	310	296	310	082	067	082	010	360	
15	44	TRIESTE	45° 39'	13° 46'	H	26.7	16.0	4.5	4.3	18.2	5.4	6.0	-	-	0.52
					g°	277	286	275	286	071	061	071	-	-	

Figura 14- Costanti Armoniche dei porti principali

Le ore di previsione sono fornite in ore legali in vigore nei rispettivi Stati, di conseguenza bisogna aggiungere un'ora all'ora riportata sulle tavole per quanto riguarda le previsioni per i porti Italiani.

Le altezze delle previsioni sono riferite al livello di riferimento degli scandagli, ovvero ad un livello convenzionale scelto in modo tale che l'acqua raramente scende al di sotto di esso (le misure di previsione hanno sempre valori positivi). Per far ciò si prende il livello medio delle basse maree sizigiali.

ANCONA

ORE DEL FUSO - 1

ORE E ALTEZZE DELLE ALTE E BASSE MAREE

GIORNO	ORA	ALTEZZA	ORA	ALTEZZA	ORA	ALTEZZA	ORA	ALTEZZA	GIORNO	ORA	ALTEZZA	ORA	ALTEZZA	ORA	ALTEZZA	ORA	ALTEZZA
GENNAIO									FEBBRAIO								
1	7.23	0.48	16.20	0.00	----	----	----	----	1	1.04	0.46	5.55	0.40	8.25	0.42	17.02	0.01
2	7.54	0.48	16.51	-0.01	----	----	----	----	2	1.18	0.47	6.30	0.38	9.19	0.40	17.30	0.02
3	2.02	0.45	4.50	0.44	8.21	0.46	17.23	-0.02	3	1.33	0.47	7.01	0.36	10.05	0.38	17.54	0.04
4	2.18	0.47	6.13	0.44	8.46	0.45	17.52	-0.01	4	1.45	0.47	7.33	0.34	10.49	0.36	18.16	0.08
5	2.40	0.48	7.33	0.43	9.00	0.43	18.20	0.00	5	1.58	0.46	8.07	0.31	11.30	0.34	18.32	0.11
6	3.00	0.48	18.45	0.02	----	----	----	----	6	2.08	0.46	8.46	0.28	12.10	0.31	18.41	0.15
7	3.20	0.47	19.04	0.06	----	----	----	----	7	2.16	0.46	9.33	0.25	12.53	0.27	18.39	0.18
8	3.36	0.47	19.19	0.10	----	----	----	----	8	2.25	0.46	10.36	0.22	13.53	0.24	18.11	0.21
9	3.52	0.47	19.23	0.14	----	----	----	----	9	2.36	0.46	11.57	0.19	----	----	----	----
10	4.04	0.46	19.04	0.17	----	----	----	----	10	2.50	0.47	13.08	0.16	----	----	----	----
11	4.16	0.47	18.44	0.19	----	----	----	----	11	3.06	0.47	13.59	0.12	----	----	----	----
12	4.30	0.47	14.55	0.15	----	----	----	----	12	3.25	0.46	14.36	0.09	----	----	----	----
13	4.50	0.48	15.00	0.11	----	----	----	----	13	3.43	0.45	15.11	0.06	----	----	----	----
14	5.13	0.48	15.21	0.07	----	----	----	----	14	1.11	0.43	4.30	0.42	5.26	0.43	15.44	0.04
15	5.47	0.48	15.46	0.04	----	----	----	----	15	0.25	0.44	4.44	0.40	7.41	0.41	16.14	0.04
16	6.30	0.48	16.13	0.01	----	----	----	----	16	0.19	0.45	5.13	0.36	8.58	0.40	16.45	0.04
17	7.23	0.47	16.41	0.00	----	----	----	----	17	0.25	0.46	5.45	0.33	9.58	0.39	17.14	0.05
18	1.46	0.45	4.40	0.43	8.19	0.46	17.10	0.00	18	0.38	0.46	6.19	0.29	10.52	0.38	17.42	0.08
19	1.41	0.45	5.45	0.41	9.13	0.44	17.39	0.00	19	0.55	0.47	6.57	0.26	11.42	0.36	18.08	0.11
20	1.49	0.46	6.40	0.38	10.05	0.42	18.07	0.01	20	1.13	0.47	7.37	0.23	12.33	0.34	18.32	0.15
21	2.04	0.47	7.31	0.35	10.57	0.39	18.35	0.04	21	1.34	0.48	8.22	0.20	13.30	0.31	18.50	0.19
22	2.22	0.48	8.27	0.32	11.47	0.35	19.01	0.08	22	1.54	0.47	9.16	0.18	14.44	0.28	18.52	0.24
23	2.45	0.48	9.28	0.28	12.41	0.31	19.23	0.12	23	2.13	0.47	10.19	0.16	----	----	----	----
24	3.09	0.48	10.41	0.25	13.49	0.26	19.35	0.17	24	2.31	0.46	11.39	0.14	----	----	----	----
25	3.34	0.48	12.00	0.20	16.04	0.23	19.10	0.21	25	2.41	0.44	13.00	0.12	----	----	----	----
26	4.01	0.48	13.10	0.16	----	----	----	----	26	2.15	0.43	14.02	0.09	----	----	----	----
27	4.29	0.47	14.02	0.11	----	----	----	----	27	0.02	0.43	14.50	0.08	23.41	0.45	----	----
28	5.00	0.47	14.46	0.07	----	----	----	----	28	15.30	0.07	23.45	0.46	----	----	----	----
29	5.36	0.45	15.25	0.04	----	----	----	----									
30	1.31	0.44	3.13	0.43	6.25	0.44	16.00	0.02									
31	0.59	0.45	5.05	0.42	7.26	0.43	16.32	0.01									

Figura 15- Previsioni di marea

4. RICOSTRUZIONE MAREA ASTRONOMICA

La previsione della marea astronomica avviene attraverso la sua scomposizione in componenti armoniche: ad un prefissato istante t_i , che nel caso in questione è di 10 minuti, si sommano le diverse componenti a cui va aggiunto il livello medio di riferimento A_0 , che per il sito di Ancona è pari a 0,30 m.

Per il calcolo della marea astronomica ad Ancona sono state utilizzate, in accordo a quanto fatto nelle tavole di marea, otto componenti armoniche: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, M4 e MS4. Per ognuna di esse sono riportati: il periodo in ore, l'ampiezza in metri e la fase in gradi centigradi, che sono costanti per ogni anno; invece ci sono due caratteristiche f e $(v_0 + u)$, che cambiano in base all'anno in questione, queste sono state ricavate da dei software di calcolo specifici.

Il periodo di riferimento di questa tesi di ricerca copre una serie temporale di 10 anni, dal 2010 al 2019. Nella tabella sottostante viene riportato come esempio l'anno 2013, considerando, come prima definito, che le prime tre grandezze (ω , A e G) sono costanti per ogni anno analizzato.

2013	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	M4	MS4
Periodo (h)	12,4206	12,00	12,66	11,9672	23,9345	25,8193	24,0659	57,9680	58,984
Ampiezza (m)	0,066	0,035	0,012	0,010	0,132	0,041	0,044	0	0
Fase (°)	332,00	347,00	326,00	347,00	88,00	74,00	88,00	0	0
Fase (rad)	5,7945	6,0563	5,6898	6,0563	1,5359	1,2915	1,5359	0	0
Z_0 (m)	0,30								
f	1,026	0,998	1,029	0,821	0,924	0,884	1,01	0	0
V_0+u (°)	270,481	359,905	16,543	216,626	18,647	247,793	349,715	0	0
V_0+u (rad)	4,7208	6,2815	0,2887	3,7808	0,3255	4,3248	6,1037	0	0

Figura 16- Tabella componenti armoniche del 2013

Successivamente riporto le tabelle che sono state estrapolate dai programmi di calcolo, utilizzate per ricavare i coefficienti f e $(v_0 + u)$, per ogni anno di riferimento.

V_0+u (°)	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	M4	MS4
2010	352,965	359,885	18,188	217,329	18,343	331,542	350,116	0	0
2011	93,920	359,884	30,316	218,615	19,089	70,683	350,335	0	0
2012	194,551	359,894	41,950	217,763	18,923	170,909	340,485	0	0
2013	270,481	359,905	16,543	216,626	18,647	247,793	349,715	0	0
2014	10,608	359,82	27,966	211,58	16,249	351,82	349,902	0	0
2015	110,676	359,953	39,032	205,252	12,954	96,783	349,932	0	0
2016	210,745	0,001	50,69	198,451	9,242	202,05	349,847	0	0
2017	286,472	0,05	24,547	193,909	6,657	281,875	348,822	0	0
2018	26,676	0,086	35,708	188,434	3,79	26,398	348,927	0	0
2019	127,05	0,114	47,678	184,583	1,977	129,413	349,104	0	0

Figura 17- Tabella di (v_0+u)

f	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	M4	MS4
2010	0,993	1,001	0,993	1,076	1,038	1,054	0,996	0	0
2011	1,005	1,000	1,088	0,981	1,000	0,996	1,000	0	0
2012	1,016	0,999	1,014	0,893	0,961	0,941	1,006	0	0
2013	1,026	0,998	1,029	0,821	0,924	0,884	1,01	0	0
2014	1,034	0,998	1,038	0,772	0,896	0,831	1,011	0	0
2015	1,038	0,998	1,034	0,749	0,882	0,802	1,011	0	0
2016	1,037	0,998	1,037	0,752	0,886	0,809	1,011	0	0
2017	1,032	0,998	1,034	0,783	0,906	0,848	1,011	0	0
2018	1,024	0,999	1,019	0,842	0,939	0,902	1,008	0	0
2019	1,013	0,999	1,012	0,926	0,978	0,96	1,002	0	0

Figura 18- Tabella fattori nodali f

Quindi, considerando t_0 equivalente alla mezzanotte del primo gennaio dell'anno in questione, si calcola il termine $f A_i \cos[\omega t + (v_0 + u) - G]$ per ogni intervallo di tempo e per ogni componente astronomica, che nella prossima tabella verrà definito come $i=1$ (M2), $i=2$ (S2), $i=3$ (N2), $i=4$ (K2), $i=5$ (K1), $i=6$ (O1), $i=7$ (P1), $i=8$ (M4) e $i=9$ (MS4), ed infine sommandoli al livello medio di riferimento si ottiene l'altezza di marea astronomica.

t	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	A ₀	H(m)
0	0,0323	0,0340	0,0078	-0,0053	0,0430	-0,0360	-0,0064	0	0	0,30	0,37
0,17	0,0372	0,0332	0,0070	-0,0048	0,0480	-0,0362	-0,0045	0	0	0,30	0,38
0,33	0,0418	0,0322	0,0062	-0,0041	0,0528	-0,0362	-0,0026	0	0	0,30	0,39
0,50	0,0462	0,0309	0,0053	-0,0035	0,0576	-0,0362	-0,0006	0	0	0,30	0,40
0,67	0,0502	0,0293	0,0043	-0,0029	0,0622	-0,0362	0,0013	0	0	0,30	0,41
0,83	0,0538	0,0276	0,0034	-0,0022	0,0668	-0,0361	0,0032	0	0	0,30	0,42
1,00	0,0571	0,0256	0,0024	-0,0015	0,0712	-0,0359	0,0052	0	0	0,30	0,42
1,17	0,0600	0,0234	0,0014	-0,0008	0,0754	-0,0357	0,0071	0	0	0,30	0,43
1,33	0,0624	0,0211	0,0003	0,0000	0,0795	-0,0354	0,0090	0	0	0,30	0,44
1,50	0,0644	0,0186	-0,0007	0,0007	0,0835	-0,0351	0,0109	0	0	0,30	0,44
1,67	0,0659	0,0159	-0,0017	0,0014	0,0873	-0,0347	0,0127	0	0	0,30	0,45
1,83	0,0670	0,0131	-0,0027	0,0021	0,0910	-0,0342	0,0146	0	0	0,30	0,45
2,00	0,0676	0,0103	-0,0037	0,0028	0,0944	-0,0337	0,0164	0	0	0,30	0,45
2,17	0,0677	0,0073	-0,0047	0,0034	0,0977	-0,0331	0,0182	0	0	0,30	0,46
2,33	0,0673	0,0043	-0,0056	0,0041	0,1008	-0,0325	0,0199	0	0	0,30	0,46
2,50	0,0665	0,0013	-0,0065	0,0047	0,1037	-0,0318	0,0216	0	0	0,30	0,46
2,67	0,0652	-0,0018	-0,0073	0,0053	0,1064	-0,0311	0,0233	0	0	0,30	0,46
2,83	0,0634	-0,0048	-0,0081	0,0058	0,1089	-0,0303	0,0249	0	0	0,30	0,46
3,00	0,0612	-0,0078	-0,0089	0,0063	0,1112	-0,0295	0,0265	0	0	0,30	0,46
3,17	0,0585	-0,0107	-0,0095	0,0067	0,1133	-0,0286	0,0280	0	0	0,30	0,46
3,33	0,0554	-0,0136	-0,0102	0,0071	0,1152	-0,0277	0,0295	0	0	0,30	0,46

Figura 19- Ricostruzione serie temporale della marea astronomica

Per verificare che i dati di marea astronomica ricostruiti in questo studio fossero corretti, si è deciso di confrontarli con quelli, raccolti all'interno delle tavole di marea, ed in particolare si è fatto riferimento ai dati di marea relativi all'ora esatta. I valori della marea ricostruita sono stati quindi confrontati con i valori di marea presi dalle tavole il cui confronto è riportato in Figura 20. Qui si rappresenta in blu l'altezza della marea astronomica mentre i puntini arancioni sono i dati presenti nelle tavole di marea. Si nota come i dati calcolati si adattano ottimamente ai dati presi dalle tavole di marea. Si ha così la possibilità di costruire l'andamento della marea per tutti gli istanti tra le alte e basse maree ed eventualmente estenderlo anche per gli anni futuri.

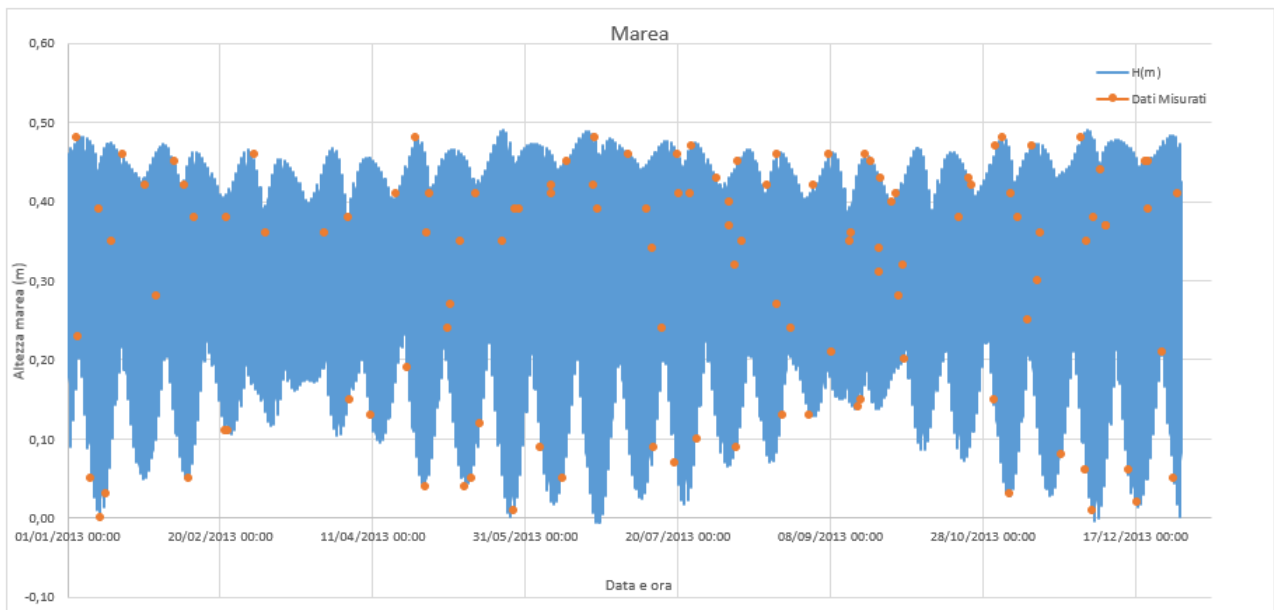


Figura 20- Plot marea calcolata-marea misurata dell'anno 2013

Successivamente si sono confrontati i valori dell'altezza di marea astronomica con i valori dei livelli marini misurati dal mareografo di Ancona; in alcuni istanti è possibile visionare dei picchi, da cui si è poi potuto calcolare il residuo tramite una semplice sottrazione tra livello idrico misurato e marea astronomica.

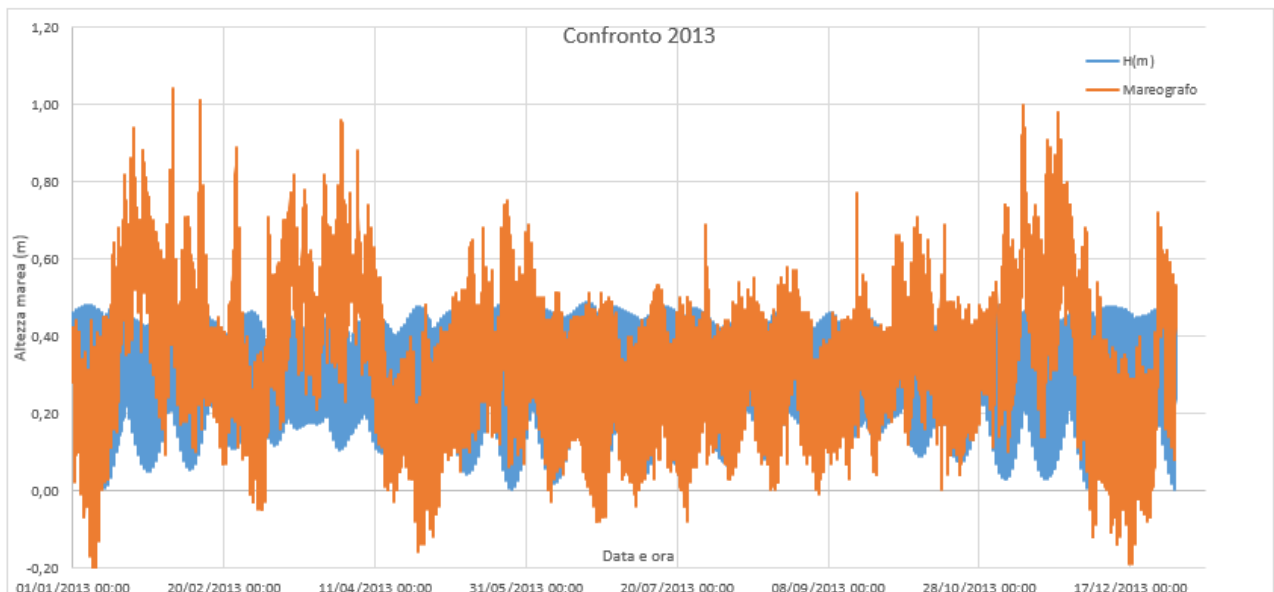


Figura 21- Confronto dati misurati-calcolati dell'anno 2013

Il grafico sottostante raffigura il residuo di marea, ottenuto come prima spiegato Si può osservare che oltre a dei valori positivi si hanno valori negativi, che rappresentano quindi un abbassamento del livello del mare.

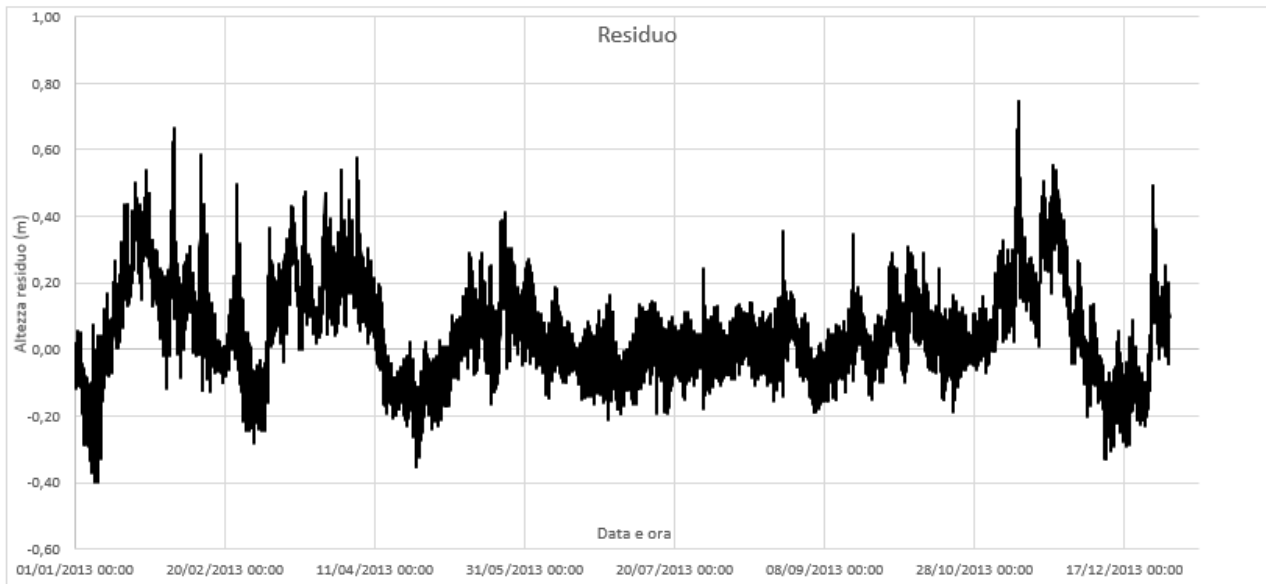


Figura 22-Residui dell'anno 2013

Il residuo essendo un fenomeno che si sviluppa a partire da più fattori (vento, pressione, storm surge), non è sempre conseguenza di un evento di mareggiata. Nel caso dei livelli marini negativi, questi possono essere associati a fenomeni di alta pressione. Ad esempio, un innalzamento di pressione produce, una depressione sul livello marino, come si può notare dal grafico sottostante. Infatti, come mostrato in Figura 23, ad inizio gennaio si ha una pressione elevata 1030 hPa ed il livello marino tende a raggiungere picchi negativi fino a -0,40 m (Figura 22).

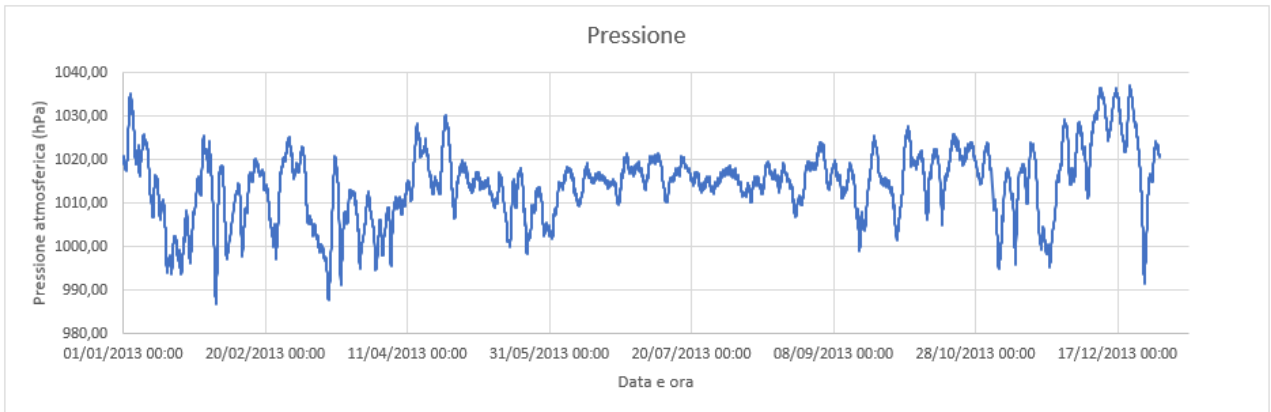


Figura 23- Plot pressione atmosferica anno 2013

Nei grafici sottostanti viene mostrato ancora il confronto tra i dati della marea astronomica e quelli misurati dal mareografo, ma riferiti in questo caso ad un periodo dell'anno più breve, in modo tale che venga evidenziato più facilmente l'andamento.

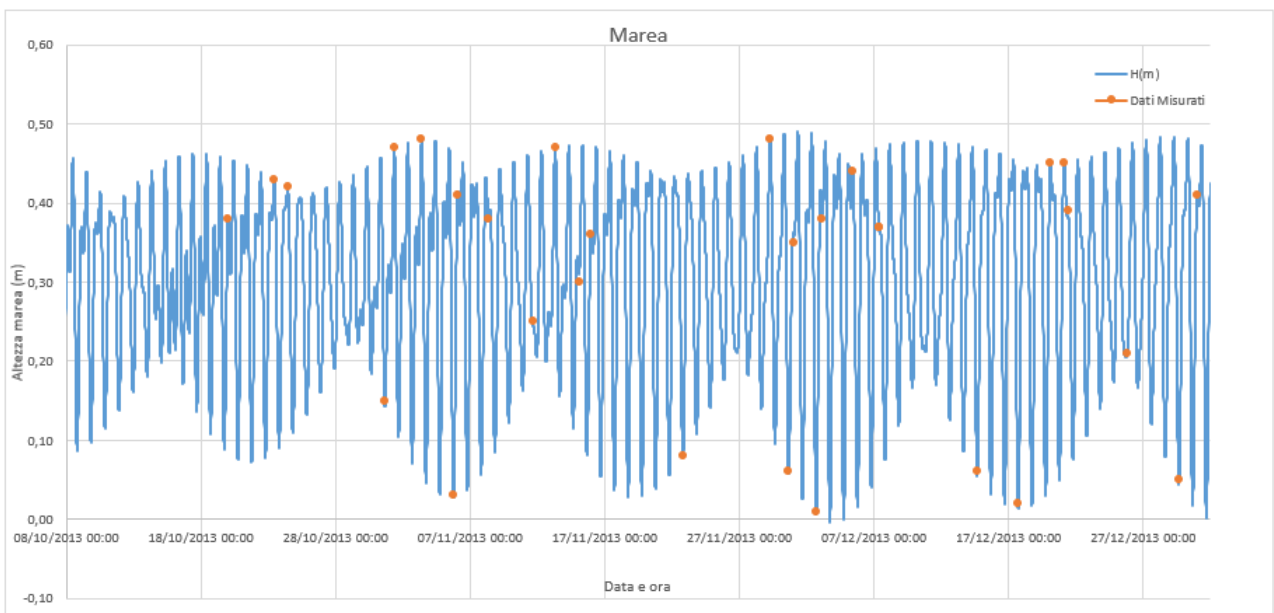


Figura 24- Plot marea astronomica ottobre-dicembre 2013

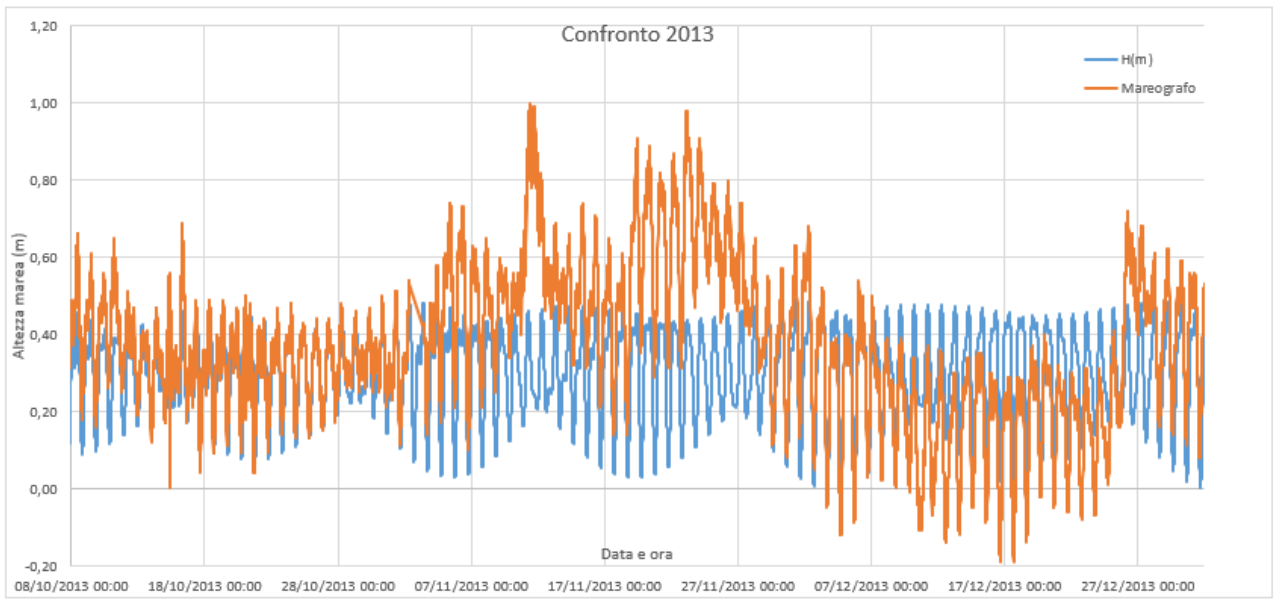


Figura 25- Plot confronto tra marea astronomica e livello marino, ottobre-dicembre 2013

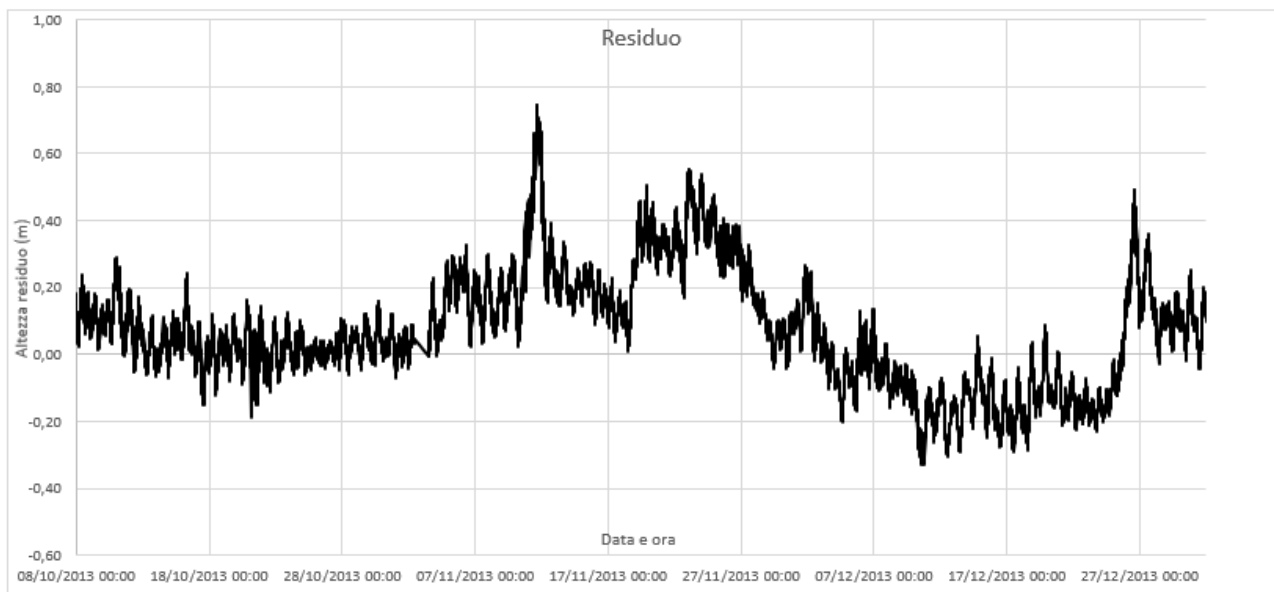


Figura 26- Plot residuo di marea, ottobre-dicembre 2013

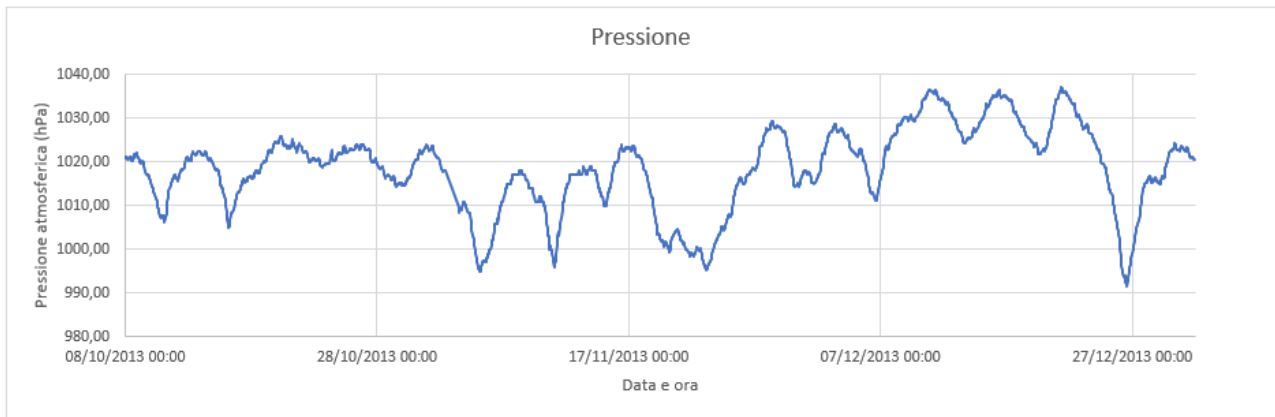


Figura 27- Plot pressione atmosferica, ottobre-dicembre 2013

4.1 RIMOZIONE OUTLIER

Prima di eseguire le analisi sui valori residui, si è deciso di pulire il segnale rispetto agli outlier, che rappresentavano appunto la registrazione, da parte del mareografo, di un valore anomalo.

I picchi eliminati sono stati tre, rispettivamente:

- 1,20 m del 18/12/2011;
- 1,42 m del 22/09/2014;
- 1,87 m del 30/11/2017.

Nei grafici sottostanti si evidenzia il prima e il dopo la rimozione del picco maggiore pari a 1,87 m:

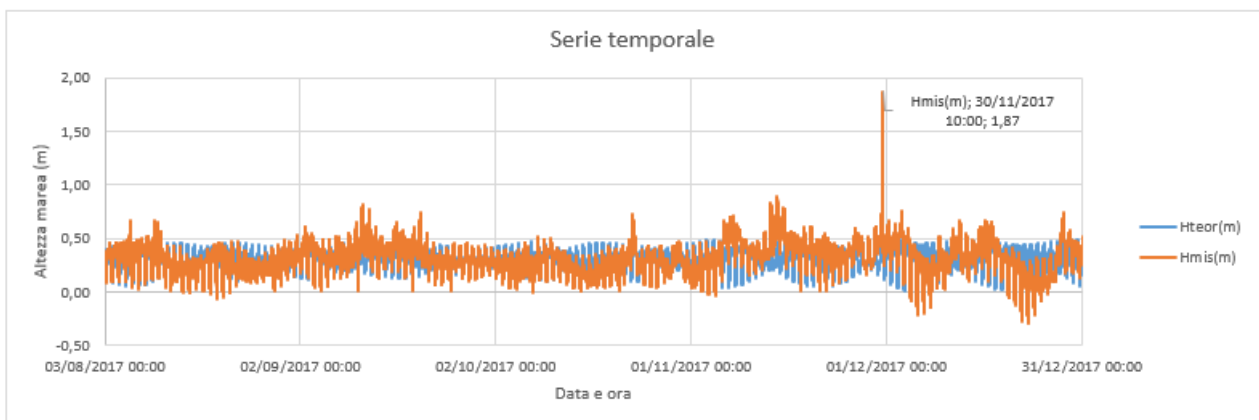


Figura 28- Plot con outlier

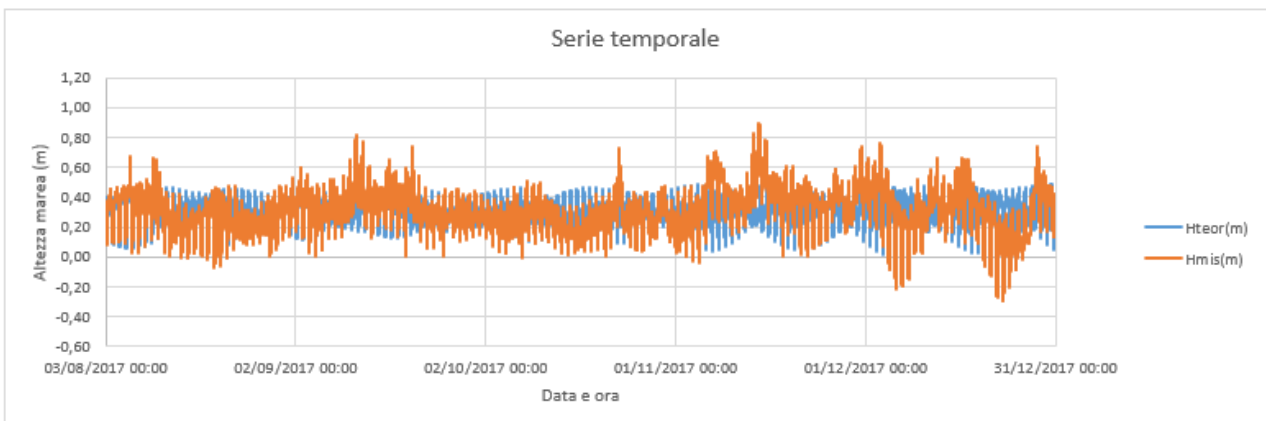


Figura 29-Plot senza outlier

4.2 ANALISI STATISTICHE

Le statistiche di lungo periodo che descrivono meglio la statistica degli estremi e si adattano alla metodologia POT sono Gumbel e Weibull. L'obiettivo finale è ricostruire la retta della legge di distribuzione.

Per l'analisi di Gumbel, si parte dal disporre la serie di eventi in ordine decrescente, andando poi a determinare la frequenza cumulativa di non superamento FC^- :

$$FC^- = 1 - \frac{m - 0,44}{N_T + 0,12}$$

dove:

- m corrisponde al numero d'ordine di ogni i -esima altezza d'onda;
- N_T corrisponde al numero totale degli eventi.

La carta probabilistica di Gumbel è un grafico costituito da un asse x e un asse y , in cui la x rappresenta il valore del parametro di riferimento e la y rappresenta il valore della variabile ridotta ed è pari a:

$$y_{ci} = -\ln(-\ln FC^-)$$

Per la determinazione della retta si sono calcolati i coefficienti A e B ed infine la Y :

$$A = \frac{S_x}{S_y}$$

$$B = \bar{x} - \frac{S_x}{S_y} \bar{y}$$

$$Y = \frac{x - B}{A}$$

Per l'analisi di Weibull, il procedimento è lo stesso solamente che si devono determinare quattro distribuzioni per: $k=0,75$; $k=1$; $k=1,4$ e $k=2$. Si dispone la serie di eventi in ordine decrescente, andando poi a determinare la frequenza cumulativa di non superamento FC^- :

$$FC^- = 1 - \frac{m - \alpha}{N_T + \beta}$$

dove α e β , sono diverse in funzione di k :

$$\alpha = 0.30 + 0.18/k$$

$$\beta = 0.21 + 0.32/k$$

Poi si determina il valore della variabile ridotta ed è pari a:

$$y_{ci} = -(\ln(1 - FC^-))^{1/k}$$

Per la determinazione della retta si sono calcolati i coefficienti A e B ed infine la Y:

$$A = \frac{S_x}{S_y}$$

$$B = \bar{x} - \frac{S_x}{S_y} \bar{y}$$

$$Y = \frac{x - B}{A}$$

4.3 ANALISI DEI RESIDUI

È stato possibile poi eseguire un'analisi statistica di lungo periodo, utilizzando la distribuzione statistica di Gumbel, andando ad evidenziare i residui massimi annuali relativi al periodo di osservazione di 10 anni.

Max Annuali	
09/01/2010 17:00	0,58
07/10/2011 13:00	0,42
01/11/2012 04:30	0,83
11/11/2013 16:40	0,75
22/10/2014 04:50	0,62
06/02/2015 01:20	0,87
11/01/2016 22:00	0,55
14/11/2017 04:50	0,57
29/10/2018 22:00	0,81
13/12/2019 23:00	0,93

Figura 30- Valori dei massimi annuali

Si sono analizzati ii dati massimi annuali con la distribuzione di probabilità degli estremi di Gumbel:

<i>Res Max</i>	<i>m</i>	<i>FC⁻</i>	<i>Y_{FC}</i>	<i>TR</i>	<i>Y</i>
0,93	1	0,9447	2,8660	18,0714	2,2213
0,87	2	0,8458	1,7873	6,4872	1,7959
0,83	3	0,7470	1,2322	3,9531	1,5123
0,81	4	0,6482	0,8358	2,8427	1,3705
0,75	5	0,5494	0,5126	2,2193	0,9451
0,62	6	0,4506	0,2267	1,8201	0,0235
0,58	7	0,3518	-0,0438	1,5427	-0,2601
0,57	8	0,2530	-0,3181	1,3386	-0,3310
0,55	9	0,1542	-0,6258	1,1822	-0,4728
0,42	10	0,0553	-1,0628	1,0586	-1,3945

Figura 31- Tabella valori retta di Gumbel

I valori sono stati riportati nel seguente plot:

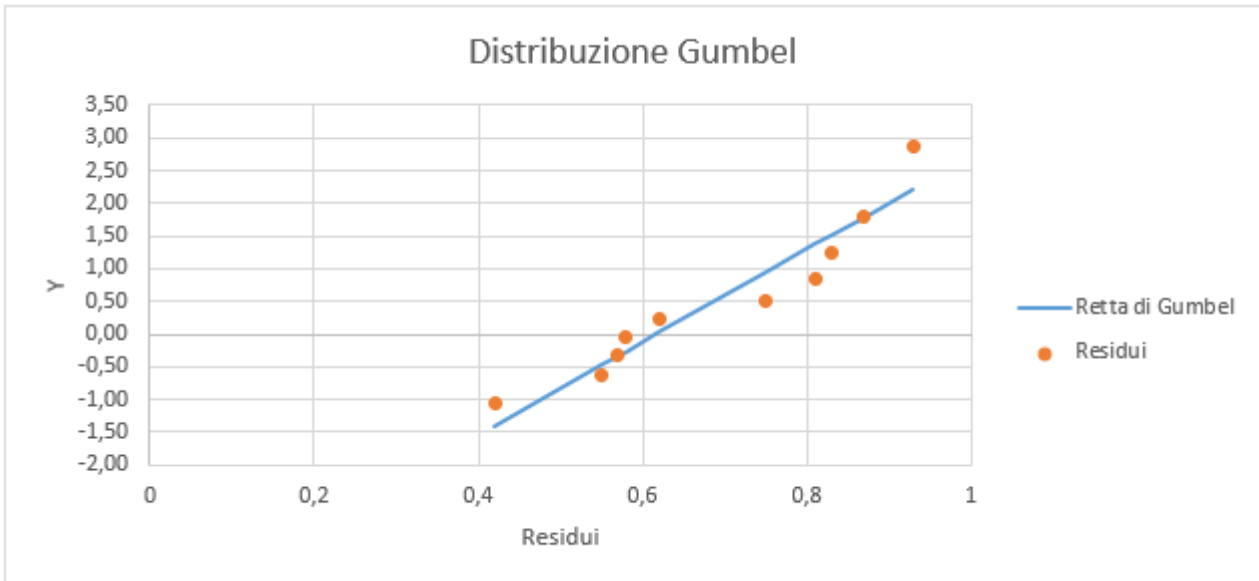


Figura 32-Distribuzione della legge di Gumbel

Per confermare la validità del modello statistico utilizzato si è ricorso all'utilizzo del coefficiente di determinazione R^2 , un indice che misura il legame tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico. Questo indice varia tra $-\infty$ e 1, quando è 0 il modello utilizzato offre una spiegazione dei dati non adatta, mentre quando è pari ad 1 vi è una perfetta correlazione.

<i>Coefficiente di Determinazione</i>	
R multiplo	0,952960278
R al quadrato	0,908133291
R al quadrato corretto	0,896649953
Errore standard	0,380936119
Osservazioni	10

Figura 33- Coefficiente di Determinazione

A livello statistico un campione di 10 dati non è significativo, si è quindi deciso di eseguire un'analisi POT (di picco sopra una certa soglia), in quanto è la più adatta visto la presenza di una quantità di dati estremi di rilievi dei valori limitata negli anni, per cui il campione di dati costituito dai massimi annuali non è sufficiente per effettuare elaborazioni statistiche.

4.4 ANALISI DEI RESIDUI POT

Lo scopo dell'analisi è individuare una distribuzione statistica che meglio rappresenti la serie di dati ottenuta dalle precedenti analisi, in modo tale da poter calcolare i fenomeni di sovrizzo per ogni tempo di ritorno. Questa analisi è fondamentale in fase di progettazione di un'opera di difesa della costa o di una qualsiasi opera portuale, per poter scegliere le forzanti di progetto (altezza d'onda ed innalzamento medio mare associato).

Per l'analisi dei residui si sono scelte tre soglie: 0,35 m; 0,40 m e 0,50 m.

Le distribuzioni utilizzate per l'analisi sono state due: la prima è quella di Gumbel; la seconda di Weibull.

Andando a considerare tutti i dati raccolti nella serie temporale di dieci anni si aveva un numero complessivo superiore ai 460000, quindi la soluzione migliore per poter avere una rappresentazione chiara degli eventi di mareggiata era impostare una soglia limite, da cui poi si sarebbe considerato il residuo massimo almeno nell'arco di 24-48 ore. In base ai valori dei massimi annuali si è scelta dapprima una soglia di 0,35 m tale da permettere l'individuazione degli eventi che costituiscono il nostro campione (sovrizzo). Il grafico sotto riportato mostra i residui che si hanno nella serie temporale, in relazione ai picchi evidenziati al di sopra della soglia a 0,35 m.

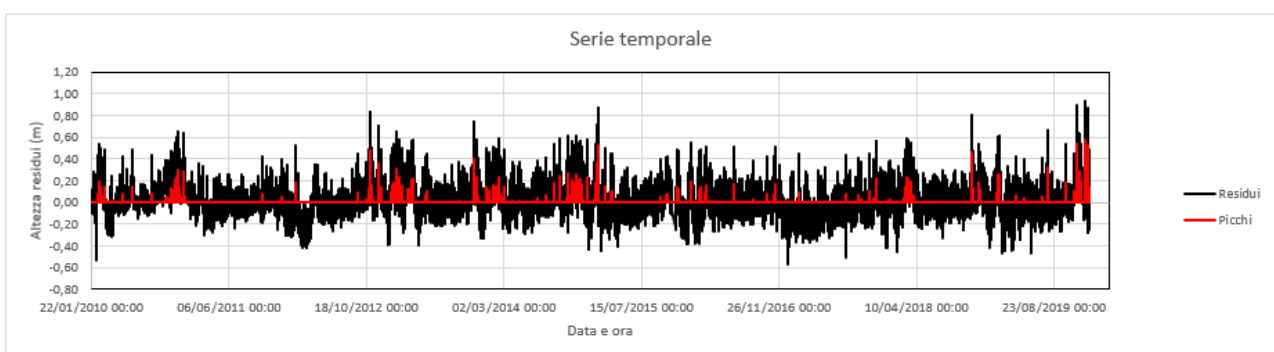


Figura 34- Plot dei residui con una soglia pari a 0,35 m

Successivamente attraverso la distribuzione di Gumbel si è potuto notare come l'andamento dei dati, per valori sotto ai 0,40 m, mostrasse un trend diverso rispetto ai valori maggiori, per cui si è deciso di utilizzare una soglia superiore per trovare la legge di distribuzione statistica più adatta.

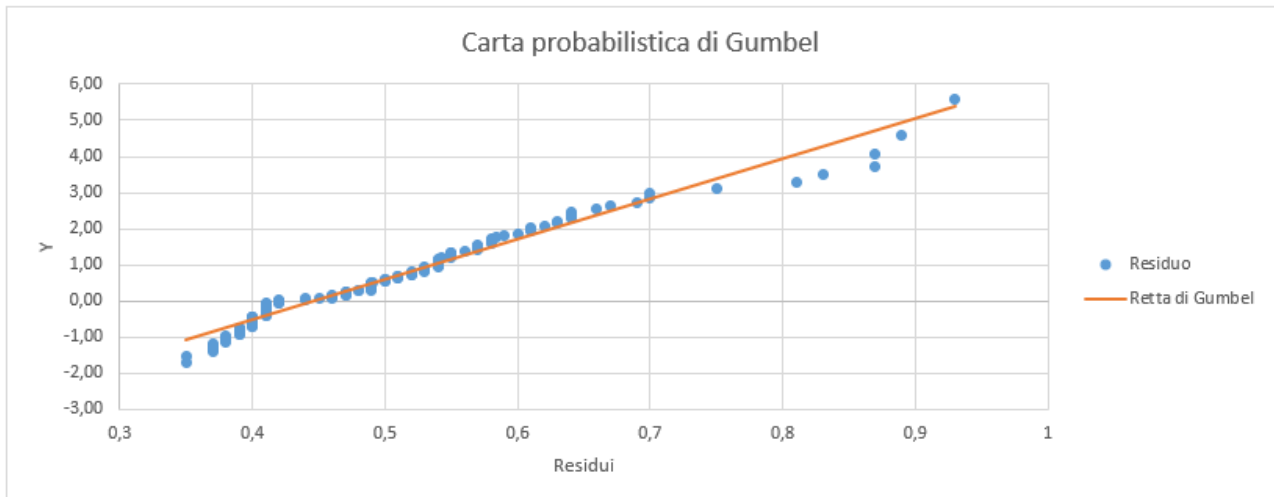


Figura 35- Distribuzione Gumbel con soglia 0,35 m

Poi si è inoltre effettuata un'analisi considerando i residui ancora più significativi valutati con una soglia pari a 0,50 m, in modo da considerare con peso maggiore gli eventi più intensi.

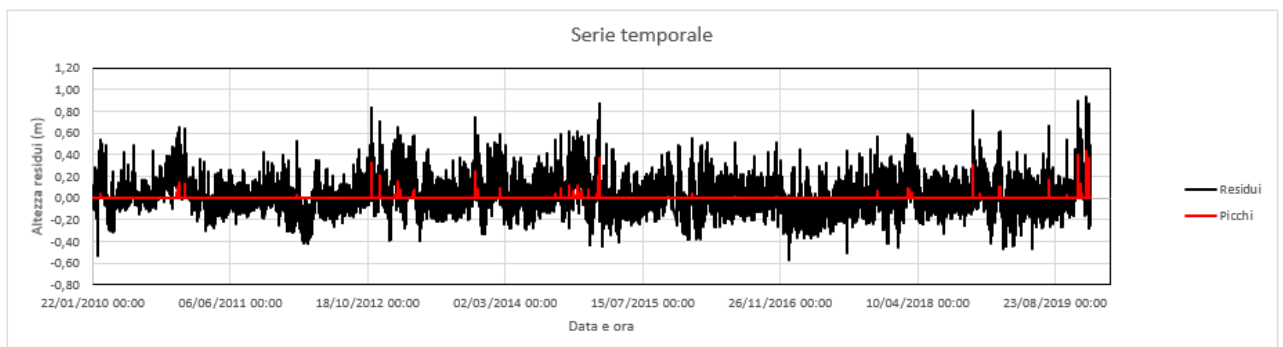


Figura 36- Plot dei residui con una soglia pari a 0,50 m

Come si può notare dal grafico sopra, la serie considerata di dati con questa soglia è ridotta (66 casi rispetto ai 151 casi ottenuti con soglia pari a 0,35 m), cioè comporta un migliore adattamento della distribuzione di Gumbel; ma non si aveva una raccolta di dati completa in quanto dell'anno 2011 veniva considerato un solo evento.

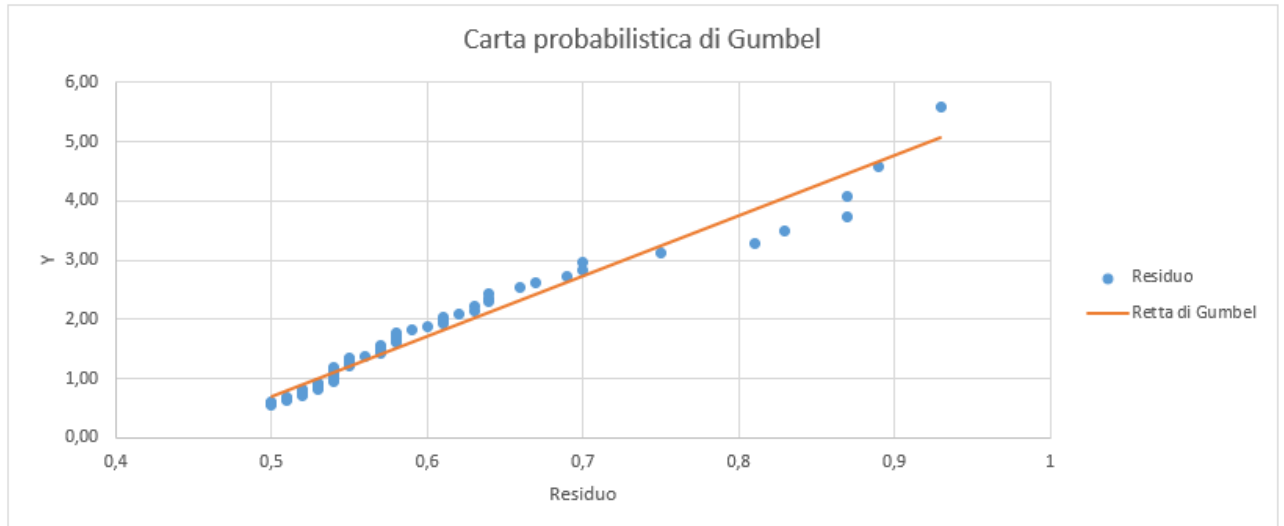


Figura 37- Carta probabilistica di Gumbel con soglia a 0,50 m

Con la soglia a 0,40 m, si garantisce il criterio di avere almeno due eventi per anno, nei 10 anni di osservazione.

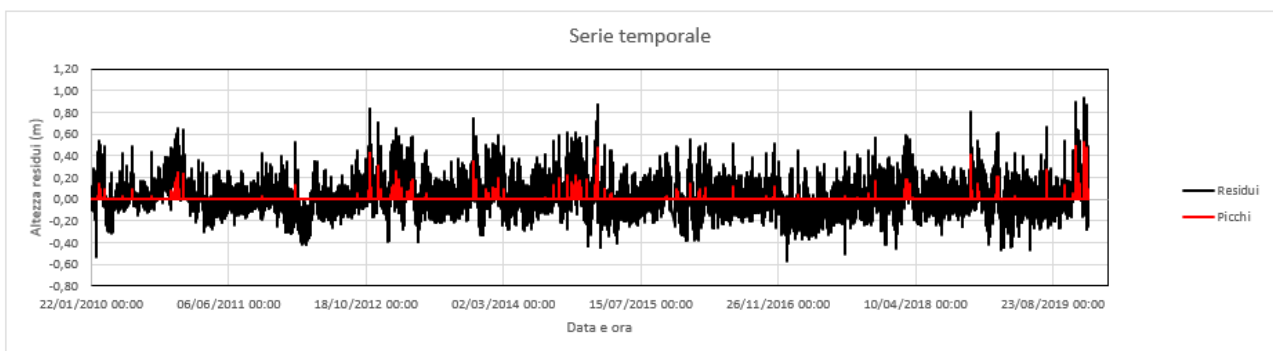


Figura 38- Plot residui con soglia pari a 0,40 m

La nuova analisi considera una serie dati da 132 eventi, con un valore massimo di 0,93 m e il minimo pari al valore di soglia. Viene riportata in seguito la tabella utilizzata per trovare i valori della retta di Gumbel, con successivo plot della retta e dei residui considerati.

<i>Res</i>	<i>m</i>	<i>FC⁻</i>	<i>y_{FCi}</i>	<i>TR</i>	<i>Y</i>
0,93	1	0,9963	5,5960	17,87133	5,14052
0,89	2	0,9897	4,5682	6,415351	4,72211
0,87	3	0,9831	4,0695	3,909354	4,51290
0,87	4	0,9764	3,7364	2,811221	4,51290
0,83	5	0,9698	3,4855	2,194725	4,09449
0,81	6	0,9632	3,2838	1,79999	3,88529
0,75	7	0,9566	3,1150	1,525602	3,25767
0,70	8	0,9500	2,9697	1,323803	2,73466
0,70	9	0,9434	2,8420	1,169153	2,73466
0,69	10	0,9367	2,7280	1,046856	2,63005
0,67	11	0,9301	2,6250	0,947722	2,42085
0,66	12	0,9235	2,5310	0,865739	2,31625
0,64	13	0,9169	2,4445	0,796811	2,10704
0,64	14	0,9103	2,3643	0,738049	2,10704
0,64	15	0,9037	2,2896	0,687359	2,10704
0,63	16	0,8970	2,2195	0,643184	2,00244
0,63	17	0,8904	2,1536	0,604345	2,00244

Figura 39- Estrapolazione tabella valori per la ricostruzione della legge

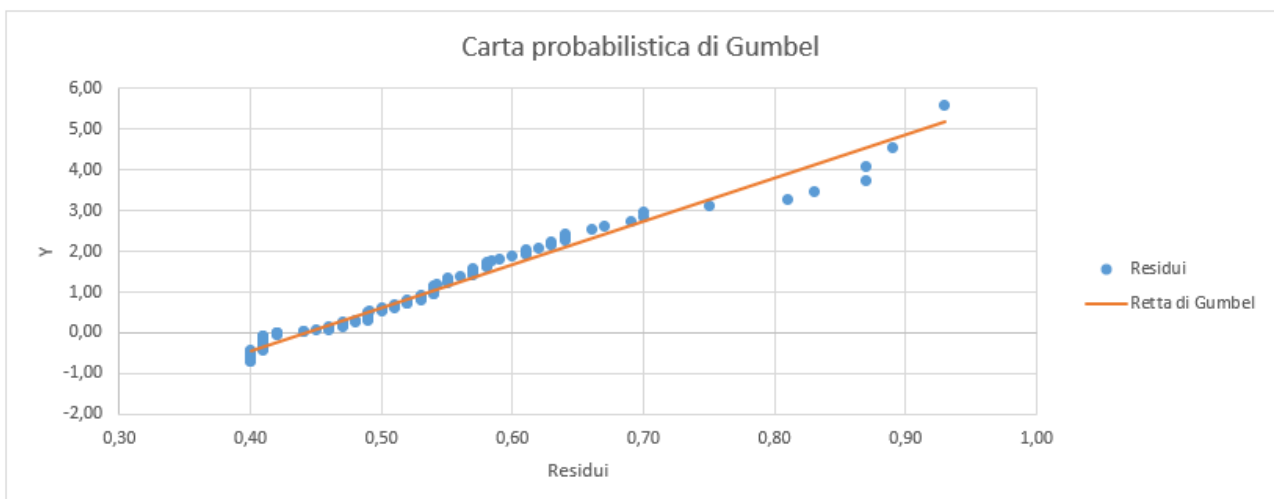


Figura 40- Distribuzione Gumbel con soglia 0,40 m

È stata poi valutata una seconda legge di probabilità, quella di Weibull, in modo tale da avere la possibilità di due alternative di scelta, e quindi di poter poi scegliere quella che garantisce il migliore adattamento.

La distribuzione di densità di probabilità di Weibull è funzione del suo parametro di forma k , si hanno quattro leggi in funzione di k pari a 0,75; 1; 1,4 e 2. Viene riportata in seguito un esempio della tabella utilizzata per trovare i valori delle rette di Weibull, con successivo plot della retta e dei residui considerati.

k=0,75					
Res	m	FC	y_{FC}	TR	Y
0,93	1	0,9970	10,4161	21,8308	7,3992
0,89	2	0,9904	7,7459	6,8782	6,8141
0,87	3	0,9838	6,6077	4,0822	6,5216
0,87	4	0,9772	5,8887	2,9024	6,5216
0,83	5	0,9706	5,3674	2,2516	5,9365
0,81	6	0,9640	4,9608	1,8392	5,6439
0,75	7	0,9574	4,6290	1,5545	4,7663
0,70	8	0,9508	4,3497	1,3461	4,0349
0,70	9	0,9442	4,1092	1,1870	4,0349
0,69	10	0,9376	3,8985	1,0615	3,8886
0,67	11	0,9310	3,7114	0,9601	3,5961
0,66	12	0,9244	3,5434	0,8763	3,4498
0,64	13	0,9178	3,3911	0,8060	3,1572
0,64	14	0,9112	3,2522	0,7461	3,1572
0,64	15	0,9046	3,1245	0,6945	3,1572
0,63	16	0,8980	3,0065	0,6496	3,0110
0,63	17	0,8915	2,8970	0,6101	3,0110
0,62	18	0,8849	2,7949	0,5752	2,8647

Figura 41- Estrapolazione tabella valori per la ricostruzione della legge, per $k=0,75$

Nel grafico sottostante è stato riportato l'andamento della distribuzione:

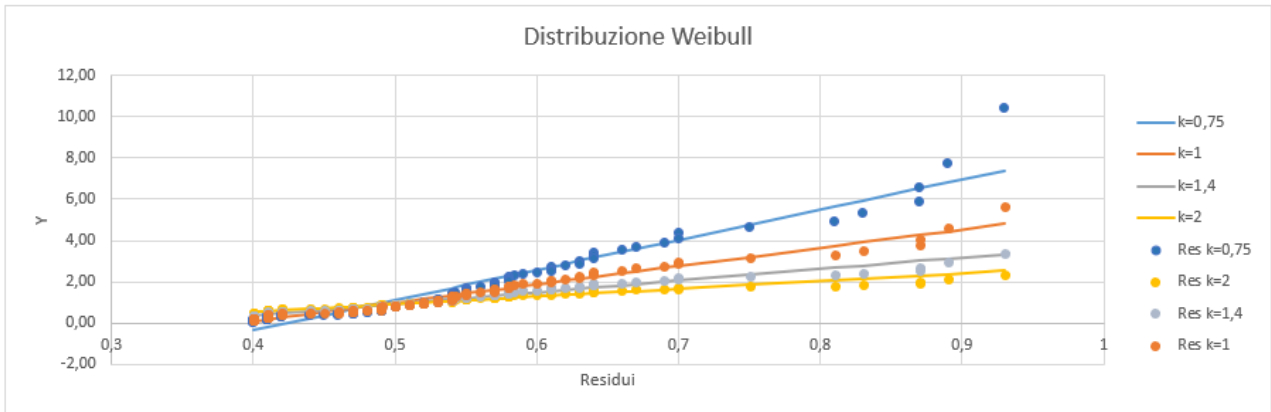


Figura 42- Confronto tra le distribuzioni di Weibull

Per valutare quale distribuzione si adattava meglio alla raccolta di dati, si è eseguito il test di adattamento di Pearson.

Gumbel								
K	P_j	P	Fc	Y	X	N_j	χ^2	χ^2 (teorico)
1	0,25	0,75	0,78	1,4047	0,5733	28	0,758	
2	0,25	0,50	0,56	0,5596	0,4934	39	1,091	
3	0,25	0,25	0,35	-0,0566	0,4351	27	1,091	
4	0,25	0,00	0,13	-0,7152	0,3728	38	0,758	
						132	3,697	3,841
<i>Verificato</i>								

Figura 43- Test di adattamento Gumbel

Weibull k=0,75								
K	P_j	P	Fc	Y	X	N_j	χ^2	χ^2 (teorico)
1	0,25	0,75	0,78	1,7616	0,5446	39	1,091	
2	0,25	0,50	0,57	0,7875	0,4780	42	2,455	
3	0,25	0,25	0,35	0,3250	0,4464	11	14,667	
4	0,25	0,00	0,13	0,0746	0,4293	40	1,485	
						132	19,697	3,841
<i>Non verificato</i>								

Figura 44-Test di adattamento Weibull k=0,75

Weibull k=1								
K	P_i	P	Fc	Y	X	N_i	χ^2	χ^2 (teorico)
1	0,25	0,75	0,78	1,5279	0,5616	33	0,000	
2	0,25	0,50	0,57	0,8348	0,4834	46	5,121	
3	0,25	0,25	0,35	0,4293	0,4377	15	9,818	
4	0,25	0,00	0,13	0,1416	0,4052	38	0,758	
						132	15,697	3,841
<i>Non verificato</i>								

Figura 45- Test di adattamento Weibull k=1

Weibull k=1,4								
K	P_i	P	Fc	Y	X	N_i	χ^2	χ^2 (teorico)
1	0,25	0,75	0,78	1,3530	0,5760	28	0,758	
2	0,25	0,50	0,57	0,8782	0,4916	39	1,091	
3	0,25	0,25	0,35	0,5457	0,4324	27	1,091	
4	0,25	0,00	0,13	0,2463	0,3791	38	0,758	
						132	3,697	3,841
<i>verificato</i>								

Figura 46- Test di adattamento Weibull k=1,4

Weibull k=2								
K	P_i	P	Fc	Y	X	N_i	χ^2	χ^2 (teorico)
1	0,25	0,75	0,78	1,2354	0,5858	23	3,030	
2	0,25	0,50	0,57	0,9127	0,4997	44	3,667	
3	0,25	0,25	0,35	0,6539	0,4306	27	1,091	
4	0,25	0,00	0,13	0,3740	0,3559	38	0,758	
						132	8,545	3,841
<i>Non verificato</i>								

Figura 47- Test di adattamento Weibull k=2

Dalle tabelle appena inserite si può visionare come il test di adattamento è verificato sia per la distribuzione di Gumbel sia per la distribuzione di Weibull per k=1,4. Quindi per poter scegliere la distribuzione definitiva si è poi calcolato il coefficiente di determinazione R^2 .

La distribuzione di probabilità che meglio si adatta al campione è quella con un R^2 che più si avvicina a 1.

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,987843462
R al quadrato	0,975834705
R al quadrato corretto	0,975648818
Osservazioni	132

Figura 48- Coefficiente di Determinazione Gumbel

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,962932027
R al quadrato	0,927238089
R al quadrato corretto	0,926678382
Osservazioni	132

Figura 49- Coefficiente di Determinazione Weibull $k=0,75$

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,985084314
R al quadrato	0,970391106
R al quadrato corretto	0,970163345
Osservazioni	132

Figura 50- Coefficiente di Determinazione Weibull $k=1$

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,986823374
R al quadrato	0,973820371
R al quadrato corretto	0,973618989
Osservazioni	132

Figura 51- Coefficiente di Determinazione Weibull $k=1,4$

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,976649561
R al quadrato	0,953844365
R al quadrato corretto	0,953489321
Osservazioni	132

Figura 52- Coefficiente di Determinazione Weibull $k=2$

La distribuzione che meglio si adatta alla serie dati è quella di Gumbel.

Successivamente vengono riportate delle tabelle in cui, in base a diversi tempi di ritorno, si sono calcolati i valori di sovrizzo da tempesta, per entrambe le distribuzioni.

Gumbel	
T_R	H
2	0,7613
5	0,8489
10	0,9148
15	0,9532
20	0,9805
25	1,0017
30	1,0189
50	1,0673
70	1,0991
100	1,1329
140	1,1647
150	1,1713
200	1,1985
300	1,2369
500	1,2852
1000	1,3508

Figura 53- Sovralzo con Gumbel

Weibull k=0,75		Weibull k=1		Weibull k=1,4		Weibull k=2	
T _R	H	T _R	H	T _R	H	T _R	H
2	0,6560	2	0,7717	2	0,9387	2	1,1613
5	0,7193	5	0,8761	5	1,1035	5	1,4087
10	0,7669	10	0,9547	10	1,2274	10	1,5946
15	0,7947	15	1,0005	15	1,2998	15	1,7032
20	0,8144	20	1,0330	20	1,3511	20	1,7801
25	0,8297	25	1,0582	25	1,3908	25	1,8398
30	0,8422	30	1,0788	30	1,4233	30	1,8885
50	0,8771	50	1,1365	50	1,5143	50	2,0250
70	0,9002	70	1,1744	70	1,5742	70	2,1149
100	0,9246	100	1,2147	100	1,6377	100	2,2101
140	0,9476	140	1,2526	140	1,6976	140	2,3000
150	0,9523	150	1,2604	150	1,7098	150	2,3184
200	0,9720	200	1,2929	200	1,7610	200	2,3952
300	0,9997	300	1,3386	300	1,8332	300	2,5035
500	1,0346	500	1,3962	500	1,9241	500	2,6399
1000	1,0820	1000	1,4744	1000	2,0474	1000	2,8250

Figura 54- Sovralzo con Weibull

Risultati molto simili si sono ottenuti anche con la soglia a 0,50 m, i risultati del test di adattamento di Pearson e del coefficiente di determinazione, mostravano che la distribuzione migliore era quella di Weibull con k=1.

Riporto in seguito i risultati del test di Pearson.

Gumbel								
K	P _i	P	FC	Y	X	N _i	χ ²	χ ² (teorico)
1	0,25	0,75	0,89	2,1646	0,6442	12	1,227	3,841
2	0,25	0,50	0,78	1,4085	0,5697	21	1,227	
3	0,25	0,25	0,67	0,9324	0,5228	21	1,227	
4	0,25	0,00	0,57	0,5641	0,4866	12	1,227	
						66	4,909	3,841
<i>non verificato</i>								

Figura 55- Test di Gumbel

Weibull k=0,75								
K	P_i	P	FC	Y	X	N_i	χ^2	χ^2 (teorico)
1	0,25	0,75	0,89	2,9071	0,6283	17	0,099	3,841
2	0,25	0,50	0,78	1,7679	0,5636	16	0,004	
3	0,25	0,25	0,68	1,1738	0,5299	21	1,750	
4	0,25	0,00	0,57	0,7926	0,5082	9	2,893	
						63	4,746	non verificato

Figura 56- Test di adattamento Weibull k=0,75

Weibull k=1								
K	P_i	P	FC	Y	X	N_i	χ^2	χ^2 (teorico)
1	0,25	0,75	0,89	2,2247	0,6395	15	0,136	3,841
2	0,25	0,50	0,78	1,5316	0,5670	18	0,136	
3	0,25	0,25	0,68	1,1261	0,5245	21	1,227	
4	0,25	0,00	0,57	0,8384	0,4944	12	1,227	
						66	2,727	verificato

Figura 57- Test di adattamento Weibull k=1

Weibull k=1,4								
K	P_i	P	FC	Y	X	N_i	χ^2	χ^2 (teorico)
1	0,25	0,75	0,89	1,7695	0,6488	12	1,227	3,841
2	0,25	0,50	0,78	1,3551	0,5710	16	0,015	
3	0,25	0,25	0,68	1,0876	0,5208	26	5,470	
4	0,25	0,00	0,57	0,8807	0,4819	12	1,227	
						66	7,939	non verificato

Figura 58- Test di adattamento Weibull k=1,4

Weibull k=2								
K	P_i	P	FC	Y	X	N_i	χ^2	χ^2 (teorico)
1	0,25	0,75	0,89	1,4907	0,6553	12	1,227	
2	0,25	0,50	0,78	1,2366	0,5746	16	0,015	
3	0,25	0,25	0,67	1,0600	0,5186	31	12,742	
4	0,25	0,00	0,57	0,9143	0,4723	7	5,470	
						66	19,455	3,841
<i>non verificato</i>								

Figura 59- Test di adattamento Weibull k=2

Riporto in seguito i risultati dei coefficienti di determinazione.

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,979496247
R al quadrato	0,959412898
R al quadrato corretto	0,958778725
Osservazioni	66

Figura 60- Coefficiente di Determinazione Gumbel

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,975976768
R al quadrato	0,952530652
R al quadrato corretto	0,951788944
Osservazioni	66

Figura 61- Coefficiente di Determinazione Weibull k=0,75

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,98171516
R al quadrato	0,963764655
R al quadrato corretto	0,963198478
Osservazioni	66

Figura 62- Coefficiente di Determinazione Weibull k=1

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,976845269
R al quadrato	0,95422668
R al quadrato corretto	0,953511472
Osservazioni	66

Figura 63- Coefficiente di Determinazione Weibull $k=1,4$

<i>Statistica della regressione</i>	
R multiplo	0,968042599
R al quadrato	0,937106473
R al quadrato corretto	0,936123761
Osservazioni	66

Figura 64- Coefficiente di Determinazione Weibull $k=2$

Dunque calcolando i sovralti di marea per i diversi tempi di ritorno, come si è fatto con la soglia a 0,35 m, si riportano le seguenti tabelle ottenuti con una soglia a 0,50 m:

Gumbel	
T_R	H
2	0,7649
5	0,8562
10	0,9247
15	0,9648
20	0,9932
25	1,0152
30	1,0331
50	1,0835
70	1,1166
100	1,1518
140	1,1849
150	1,1917
200	1,2200
300	1,2600
500	1,3103
1000	1,3785

Figura 65- Sovralzo con Gumbel

Weibull k=0,75	
T _R	H
2	0,6558
5	0,7084
10	0,7480
15	0,7711
20	0,7875
25	0,8002
30	0,8105
50	0,8396
70	0,8587
100	0,8789
140	0,8981
150	0,9020
200	0,9183
300	0,9414
500	0,9704
1000	1,0097

Weibull k=1	
T _R	H
2	0,7616
5	0,8586
10	0,9316
15	0,9741
20	1,0043
25	1,0277
30	1,0468
50	1,1004
70	1,1356
100	1,1730
140	1,2082
150	1,2154
200	1,2456
300	1,2880
500	1,3415
1000	1,4141

Weibull k=1,4	
T _R	H
2	0,9533
5	1,1272
10	1,2580
15	1,3343
20	1,3884
25	1,4304
30	1,4647
50	1,5607
70	1,6239
100	1,6909
140	1,7541
150	1,7670
200	1,8210
300	1,8972
500	1,9931
1000	2,1233

Weibull k=2	
T _R	H
2	1,2587
5	1,5529
10	1,7740
15	1,9031
20	1,9947
25	2,0656
30	2,1236
50	2,2859
70	2,3928
100	2,5061
140	2,6130
150	2,6349
200	2,7263
300	2,8550
500	3,0172
1000	3,2373

Figura 66- Sovralzo con Weibull

4.5 EVENTI DI MAREGGIATA

Durante lo studio dei residui è stato possibile individuare tre eventi di mareggiata che risaltano rispetto agli altri, sia in termini di dimensione del fenomeno, sia in termini di danni provocati.

Questi eventi hanno interessato tutta la zona del nord Adriatico, ma nello specifico i plot successivi sono riferiti al sito di Ancona.

Il primo evento si è registrato il 06/02/2015; da dei rapporti presentati dall'ISPRA si è potuto ricostruire le condizioni metereologiche che hanno portato alla manifestazione di questo fenomeno. Dal 30 gennaio fino al 06 febbraio si sono registrati ben 7 superamenti di quota, tra cui il sesto giorno superiore ai 120 cm. I valori di sovrizzo sono da ricondursi al ripresentarsi di una sessa, diretta conseguenza di un impulso meteorologico. La singolarità dell'evento sta nella stagionalità: solitamente il mese di febbraio è noto per registrare valori barici molto alti. Il grafico sottostante mette in relazione la marea astronomica con la marea misurata, mettendo in evidenza i residui: le linee blu rappresentano la marea misurata dal mareografo, la linea arancione la marea astronomica e la linea grigia rappresenta i residui di sovrizzo.

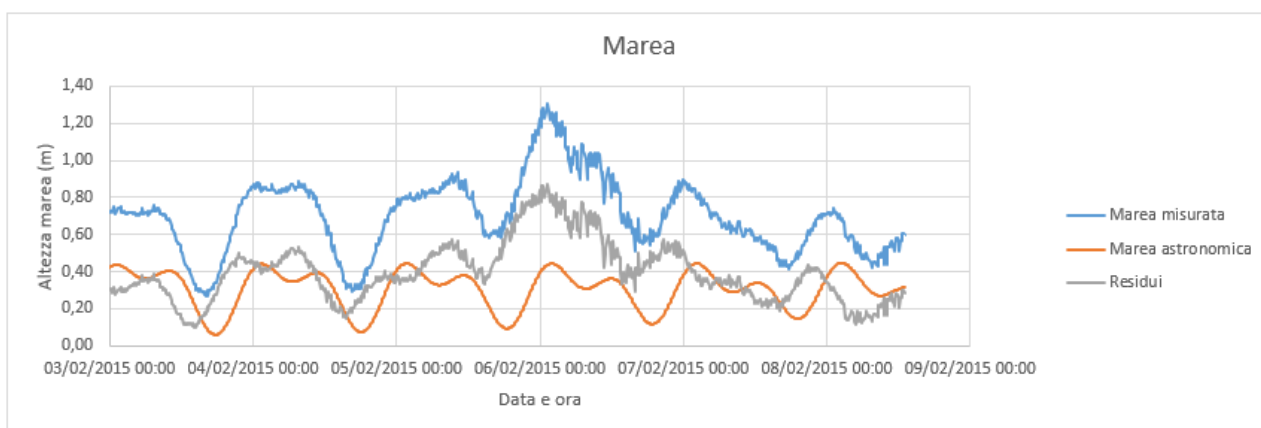


Figura 67- Plot marea

Il seguente grafico rappresenta lo studio delle onde nello stesso periodo. I dati sono stati presi dal modello oceanografico Copernicus in un punto situato al largo di Ancona, in corrispondenza della posizione in cui era situata la boa ondometrica del RON. Sono stati quindi confrontati i valori delle altezze d'onda con i valori dell'angolo di direzione dell'onda.

La mareggiata presenta all'inizio dell'evento un angolo di direzione di 120°, quindi onde generate con un vento da Scirocco, per poi cambiare durante la perturbazione, fino a raggiungere un angolo compreso tra i 60°-70°, ortogonale alla costa.

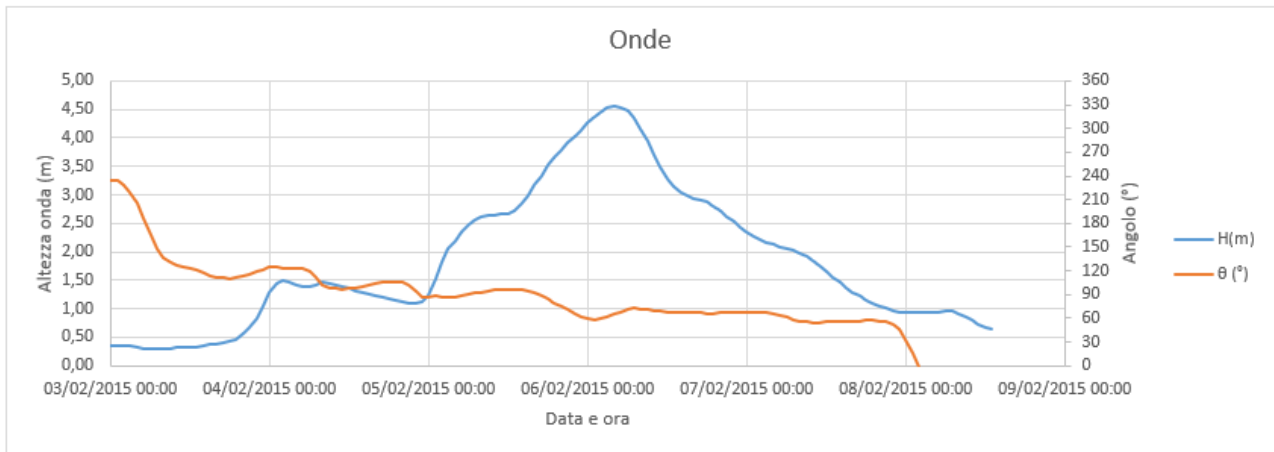


Figura 68- Plot onde

Nel confronto tra l'altezza d'onda e i residui si può notare che la mareggiata ha un'influenza diretta sui residui; il residuo di sovranzo è determinato prevalentemente da un evento di acqua alta originato da una mareggiata. Inoltre l'onda più alta, che supera i 4,50 m, ha un periodo di 8,39 secondi.



Figura 69-Plot confronto tra i residui e l'altezza di marea

Questo evento ha provocato ingenti danni nel centro Italia, soprattutto gli stabilimenti balneari di Marotta e la costa di Ancona, da Torrette a Portonovo.



Figura 70- Stabilimenti balneari Marotta



Figura 71- Lungomare Ancona

Nell'immagine sottostante è rappresentata il pianetto del Porto di Ancona e possiamo osservare come è posizionato il muro paraonde del cantiere navale di Fincantieri, all'interno del porto di Ancona, che si è ribaltato perfettamente di 90°, ciò perché l'onda avvicinandosi alla costa si è perfettamente direzionata ortogonalmente ad essa.

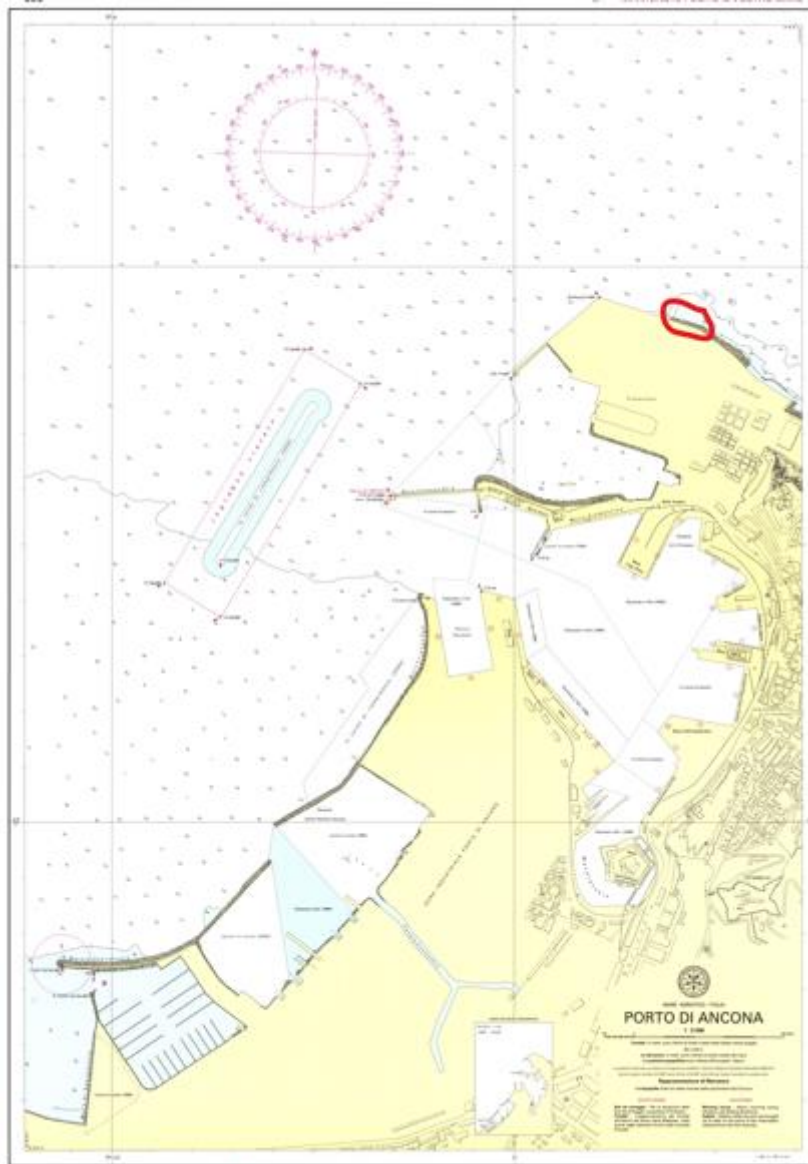


Figura 72-Cartina del Porto di Ancona



Figura 73- Fincantieri, porto di Ancona

Gli altri due episodi rappresentano l'inizio e la fine di un evento unico di sovralti rispetto alla marea astronomica, che si è sviluppata per il periodo di un mese, rispettivamente il 12/11/2019 e il 13/12/2019. Il 12 novembre sul Tirreno era presente una profonda depressione barica che ha generato forti venti di Scirocco lungo l'asse principale del Mare Adriatico, mentre, contemporaneamente nel nord Adriatico avveniva un richiamo di venti di Bora. In aggiunta a questa configurazione, che generalmente causa eventi di acqua alta nella Laguna di Venezia, il nord Adriatico è stato interessato dal passaggio di un vortice ciclonico, causando raffiche di vento molto forti. Quindi l'ulteriore aumento del livello idrico si è ottenuto per effetto del barometrico inverso.

Nel seguente grafico si ha lo studio della marea astronomica con quella misurata, e il relativo residuo; la linea grigia rappresenta la marea misurata, la linea arancione la marea astronomica e la linea blu il residuo.

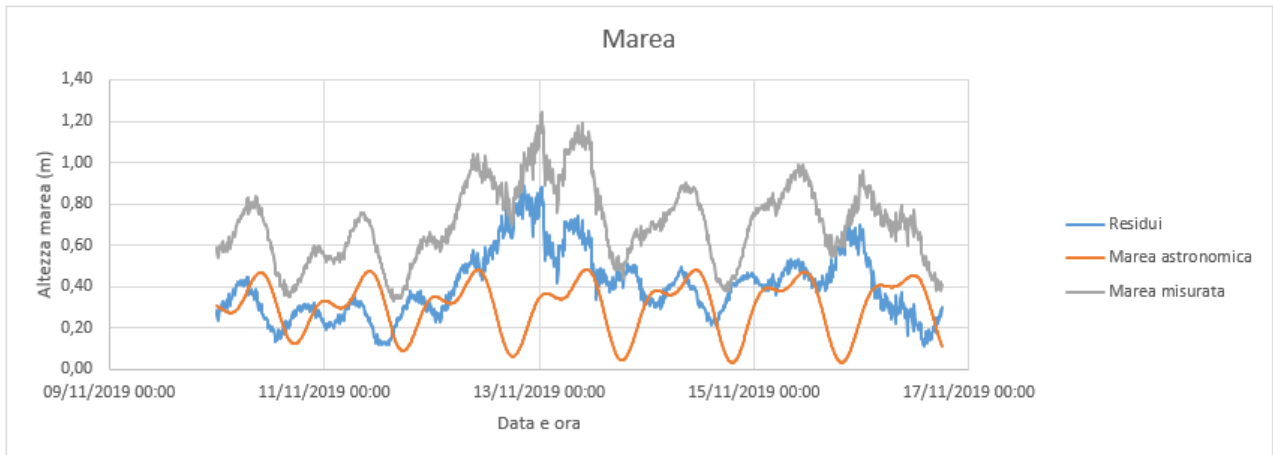


Figura 74-Plot mare 12/11/2019

Nel grafico sottostante, che mette in relazione l'altezza d'onda con l'angolo di direzione dell'onda, si può notare come l'onda che genera, il sovralzato maggiore, è superiore ai 3,20 m, e presenta un periodo molto lungo pari a 10,15 secondi. L'onda ha una direzione di 120° rispetto all'inclinazione della costa, ciò significa che il vento che genera il sovralzato proviene dal sud e quindi è un vento da Scirocco.

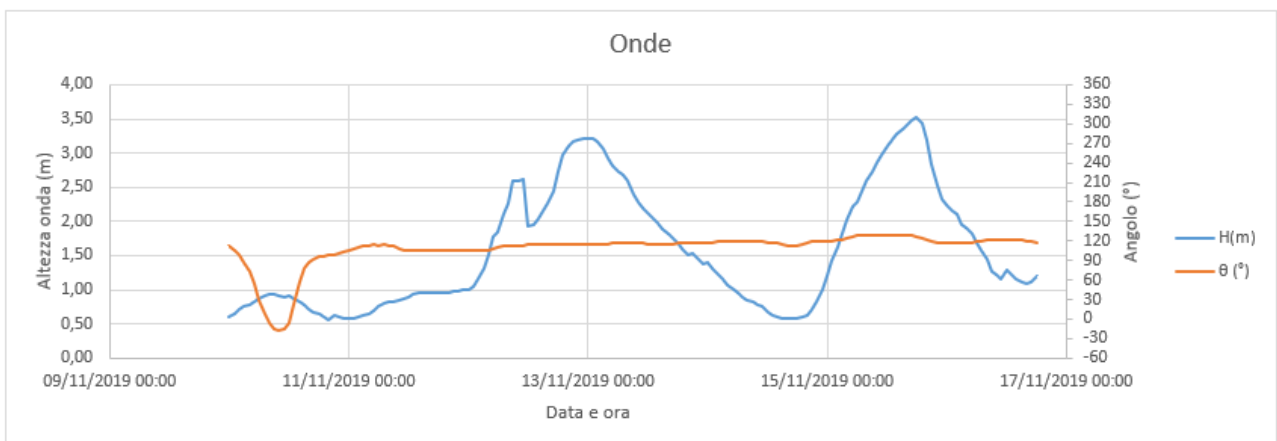


Figura 75- Plot onde evento 12/11/2019

Nell'ultimo plot, come quello di prima, è possibile valutare il confronto tra i valori di altezza d'onda con i valori dei residui. Anche in questo caso il sovralzò è una conseguenza diretta di un evento di acqua alta provocato da un fenomeno di tempesta.



Figura 76- Plot confronto evento 12/11/2019

Il grafico sottostante mostra quello che è stato registrato a Venezia durante questo particolare evento di marea in cui si nota che il sovralzò sia dovuto principalmente agli effetti di pressione atmosferica e vento, in quanto il contributo di marea è molto basso rispettivamente pari a 26 cm.

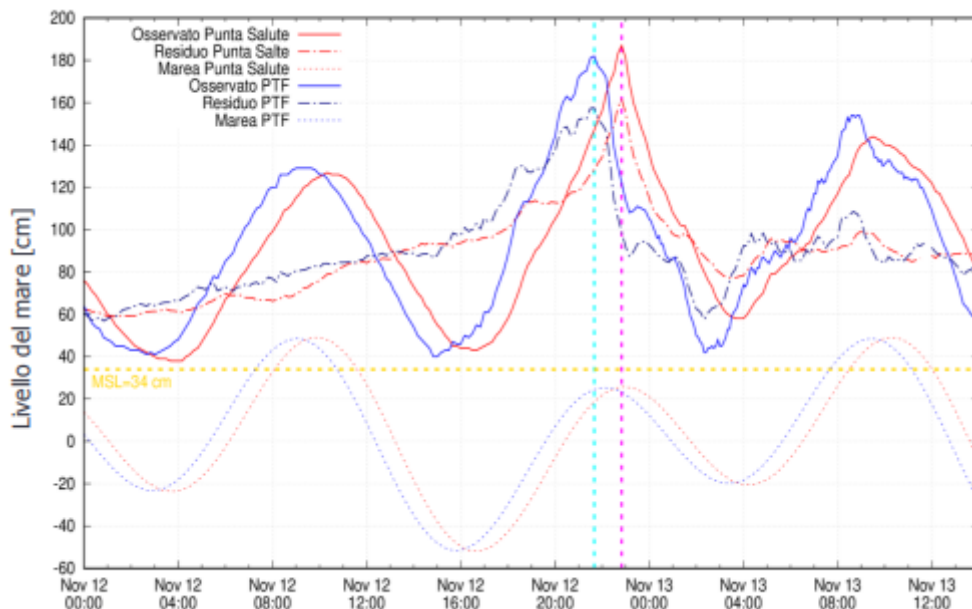


Figura 77-Grafico dell'evento del 12/11/2019 registrato a Venezia

Ripropongo gli stessi tra grafici per l'evento di mareggiata del 13/12/2019, prestando particolare attenzione per il grafico oggetto di studio delle onde, che mostra come l'onda più alta raggiunga quasi i 4 metri, con un periodo di 7,63 secondi ed un angolo di direzione pari a 0°, quindi il sovrizzo è generato da nord.

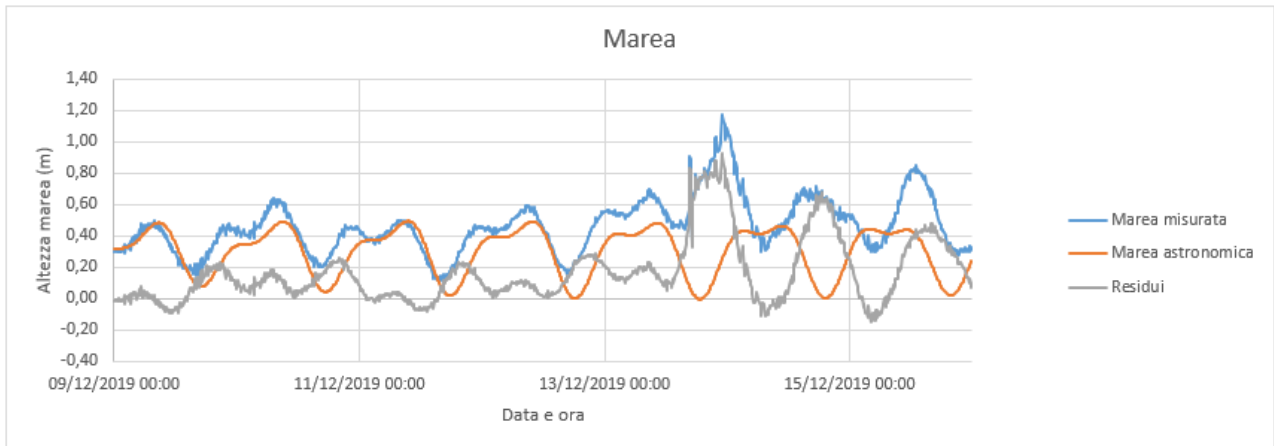


Figura 78– Plot marea 13/12/2019

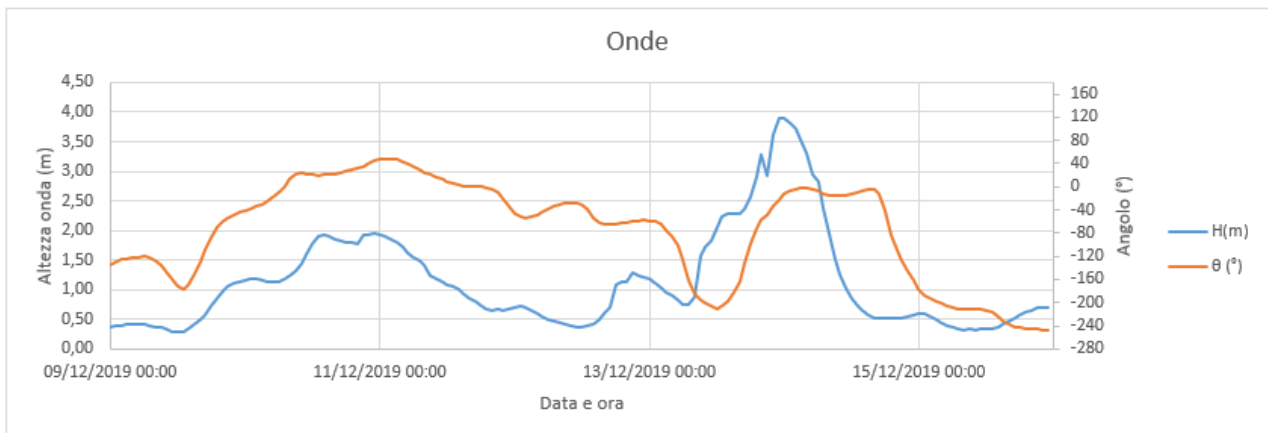


Figura 79– Plot onde evento 13/12/2019

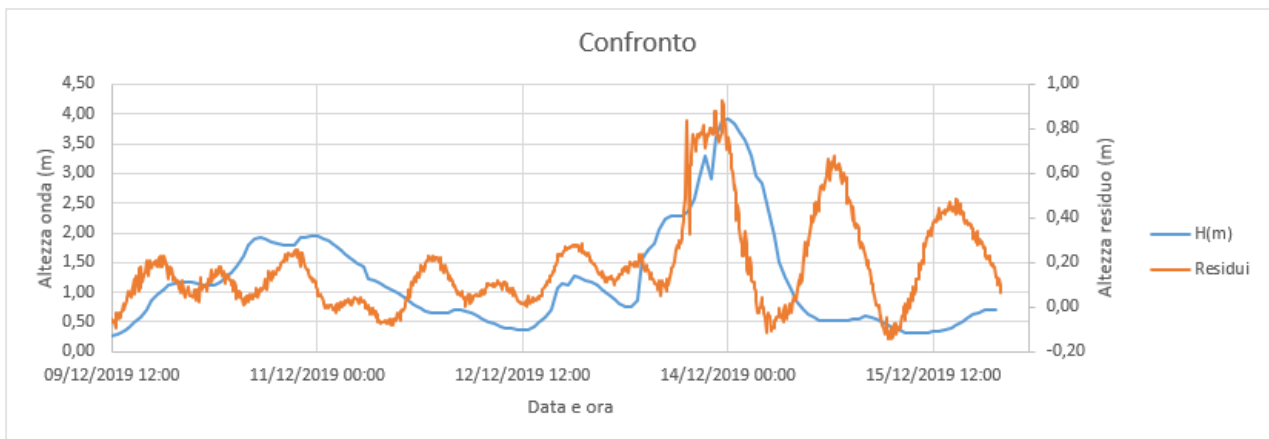


Figura 80– Plot confronto evento 13/12/2019

L'effetto più appariscente dell'episodio perturbato è stata la straordinaria onda di marea che ha colpito Venezia, dopo un primo picco al mattino del 12 (127 cm sullo zero mareografico di Punta della Salute), in serata la marea astronomica si è sfavorevolmente combinata con le forzanti meteorologiche nel determinare una seconda onda di marea con 187 cm registrati. All'intensità dell'episodio ha contribuito la convergenza tra il forte scirocco in risalita dall'Adriatico e il vento in rotazione da Nord-Est fenomeno detto "scontratura", cioè la convergenza di correnti marine provocate da venti da Nord-Est e Sud-Est.



Figura 81- Laguna di Venezia

Nella foto seguente è possibile vedere gli effetti provocati da questa mareggiata sul litorale di Fano.



Figura 82– Litorale di Fano

5. CONSIDERAZIONI FINALI

L'obiettivo dell'analisi era quello di valutare l'entità del sovrizzo in funzione di diversi tempi di ritorno, analizzando i dati misurati dagli strumenti presenti alla stazione mareografica di Ancona.

Partendo dalla ricostruzione della marea astronomica, per tutti gli anni dal 2010 al 2019, si è potuta valutare l'entità della marea meteorologica andando a confrontare i dati ricostruiti di marea con i valori dei livelli marini registrati dal mareografo di Ancona. Depurando i valori misurati da quelli ricostruiti, si sono ottenuti i residui di marea.

È stata effettuata un'analisi statistica di lungo periodo dei residui di marea considerando due diverse distribuzioni di probabilità (Gumbel e Weibull).

Grazie al calcolo del coefficiente di determinazione e al calcolo del test di adattamento si è potuta scegliere come distribuzione finale, quella che meglio si adattava alla serie di dati raccolta, la distribuzione di Gumbel; in quanto il test di adattamento era verificato e si era ottenuto un coefficiente di determinazione pari a 0,9756, rispetto all'altra distribuzione per Weibull con $k=1,4$ che aveva sempre il test di adattamento verificato ma un coefficiente di determinazione pari a 0,9736.

Una volta individuata la distribuzione statistica che meglio adatta il campione costituito dai residui di marea, si è potuta utilizzare la legge di distribuzione per poter valutare per tempi di ritorno l'entità del sovrizzo del livello marino.

Se ad esempio, in fase di progetto, si considera un tempo di ritorno di 30 anni, oltre all'onda di progetto si dovrà considerare un sovrizzo di 1,02 m; o ad esempio per un tempo di ritorno di 150 anni si dovrà considerare un'altezza di sovrizzo pari a 1,17 m.

Andando ad analizzare i risultati ottenuti dei sovrizzi di marea con una soglia a 0,50 m, quindi considerando gli eventi massimi che si sono avuti nei 10 anni, si può notare che per un tempo di ritorno di 30 anni si avrà un sovrizzo di 1,05 m, o per un tempo di ritorno di 150 anni si avrà un'altezza di sovrizzo pari a 1,20 m; quindi si ottengono risultati molto simili.

È giusto considerare il sovrizzo in fase di progettazione? In conclusione, secondo me è la scelta migliore, considerando il sovrizzo ci si mette a favore di sicurezza in fase progettuale, andando a considerare le eventuali mareggiate caratteristiche del nostro sito di riferimento,

in quanto è un ambiente favorevole a questi fenomeni. Inoltre in quanto è possibile prevederli, in funzione di tutti gli aspetti descritti in questa tesi, andando ad evitare di dover poi riporre rimedio alle distruzioni di opere.

6. BIBLIOGRAFIA

"ISPRA", www.mareografico.it

"ISPRA Servizio laguna di Venezia", www.Venezia.Ispraambiente.it

"Manual of harmonic analysis and prediction of tides", *Special publication no. 98 revised (1940) edition*

"Tides, Surges and Mean Sea-Level", *John Wiley & Sons*

"Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea", *journal of geophysical research, vol. 112*