

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio



Tesi di Laurea Magistrale

**Hydrogeologic modeling for surface/groundwater integrated
management**

Relatrice

Prof.ssa Tosco Tiziana

Candidato

Belvedere Piergiorgio

Corelatore

Prof. Casasso Alessandro

Prof.ssa Prigiobbe Valentina

Anno Accademico 2018/2019

Indice

Abstract	I
1 Motivazione e introduzione.....	1
1.1 Motivazione.....	1
1.2 Introduzione.....	3
2 Materiali e metodi	6
2.1 Area di studio.....	7
2.2 Monitoraggio delle acque superficiali e sotterranee.....	12
2.3 Analisi dei sondaggi geognostici.....	14
2.4 Monitoraggio del livello di falda.....	17
2.5 Oscillazioni del fiume Hudson	22
3 Modellazione del flusso sotterraneo.....	23
3.1 Griglia di calcolo	29
3.1.1 Condizioni al contorno.....	30
3.2 Stima della conducibilità idraulica.....	32
3.3 Condizioni di ricarica.....	36
4 Risultati e discussione	39
4.1 Anali dati misurazioni in campo.....	39
4.2 Ricostruzione stratigrafica.....	44
4.3 Analisi di sensitività	50
4.4 Simulazioni.....	53
5 Conclusioni.....	58
Appendice A: specifiche tecniche dei trasduttori di pressione	61
Appendice B: ricostruzione stratigrafica attraverso l'utilizzo del software ArcGIS	62

Bibliografía.....	65
-------------------	----

Abstract

Comprendere le dinamiche che intercorrono tra acquiferi, corpi idrici superficiali, sistema fognario, forzanti climatiche è un problema impellente del XXI secolo. L'incremento della popolazione mondiale porta ad una sempre crescente domanda di beni di primo consumo, quali ad esempio acqua potabile e derrate alimentari, perciò in quest'ottica è di vitale importanza preservare le riserve idriche contenute negli acquiferi.

Nel presente elaborato si affronterà la caratterizzazione e la modellazione delle interazioni che intercorrono tra acque sotterranee e acque superficiali in zone urbano-costiere, prendendo come modello l'acquifero che si colloca nell'area di Hoboken, città situata nella contea di Hudson, New Jersey, USA. L'area di studio è soggetta ad inondazioni imputabili ad un continuo aumento della frequenza di eventi climatici estremi, quali uragani ed eventi piovosi di notevole portata, e ad un continuo innalzamento del livello idrico dell'estuario del fiume Hudson, il quale separa lo stato del New Jersey dallo stato di New York, che interagendo con le acque sotterranee ne provoca un innalzamento.

Il bacino urbano della città di Hoboken è stato considerato come una sorta di laboratorio urbano per questo studio, poiché la sua estensione areale è contenuta, presenta infrastrutture ed un uso del suolo paragonabili a quelli esistenti nella maggior parte delle città di grandi dimensioni. È un'area che presenta una bassa elevazione sul livello del mare, soggetta ad inondazione e che risente dell'innalzamento degli oceani. Gran parte del sistema fognario risulta essere gravemente danneggiato, poiché ormai datato ed usurato; ciò comporta il verificarsi di fenomeni di percolazione di refluo all'interno dell'acqua di falda, nelle aree in cui le tubazioni si collocano al di sopra del livello di falda, e fenomeni di infiltrazione di acqua di falda all'interno della rete fognaria, nelle aree in cui l'acqua di falda si trova al di sopra delle tubazioni. L'infiltrazione dell'acqua di falda all'interno della rete fognaria provoca un incremento nella frequenza di intervento del sistema di regolazione della portata reflua, atto ad evitare un sovraccarico del sistema di trattamento dei reflui civili posto a valle, il quale convoglia la portata reflua che eccede la capacità di trattamento all'interno del fiume Hudson.

Per la modellazione della falda idrica è stato realizzato un modello numerico, attraverso l'utilizzo di ModelMuse, interfaccia grafica open-source del software di modellazione MODFLOW-2005 sviluppato dall'USGS (United States Geological Survey). Attraverso l'interpretazione di sondaggi geognostici e l'uso di tecniche di interpolazione sono stati ricostruiti gli andamenti topografici dello strato di copertura superficiale e di fondo. Per individuare le condizioni al contorno e i termini forzanti sono stati analizzati i livelli di falda, gli afflussi meteorici e l'andamento della marea; mentre per la previsione di scenari futuri sono stati analizzati il trend del livello idrico del fiume Hudson e la riparazione di parte del sistema fognario. Il livello di falda in gran parte dell'area di studio si attesta a pochi metri al di sotto del piano campagna, l'influenza del flusso meteorico è risultato essere trascurabile a causa dell'estesa urbanizzazione.

1 Motivazione e introduzione

1.1 Motivazione

Gli acquiferi costali rappresentano risorse idriche vitali per il sostentamento delle popolazioni e degli ecosistemi. Essi sono attraversati da enormi volumi di acqua poiché sono zone di transizione tra sistemi terrestri e marini. Un cambiamento nelle caratteristiche di queste zone, sia esso indotto da fattori di stress antropici che naturali, può intaccare il delicato bilancio di interazione tra acqua proveniente dall'acquifero e acqua salata proveniente dagli oceani, provocando ad esempio un eccessivo innalzamento del livello di falda cui possono seguire fenomeni di allagamento. Bisogna considerare che queste aree sono soggette a una notevole pressione antropica poiché ospitano insediamenti di grandi dimensioni.

Preservare la qualità delle risorse idriche è una tra le tematiche più importanti odierne e future, perciò è necessario un continuo approfondimento nella comprensione delle complesse dinamiche di interazione che caratterizzano gli acquiferi; ad esempio è fondamentale valutare i possibili impatti di un'urbanizzazione in costante aumento o di condizioni climatiche in continua evoluzione. La crescente richiesta di risorse naturali e di spazi urbani sottopone l'ambiente e gli ecosistemi a fattori di stress che hanno condotto ad una degradazione progressiva delle aree costiere e dei corpi idrici [1].

Le dinamiche di interazione nelle aree costiere sono molto complesse, poiché risentono non solo di cambiamenti su scala locale, quali ad esempio variazione della conducibilità del terreno indotta dall'urbanizzazione o l'interazione tra acque sotterranee e reflui civili dovute al danneggiamento delle reti fognarie, ma anche a scala globale. Gli impatti di cambiamenti su scala globale, quale ad esempio l'innalzamento degli oceani, vengono amplificati in queste aree poiché agiscono sia sulle dinamiche oceaniche che sulla morfologia costiera.

Nel 2016 la concentrazione di CO₂ atmosferica ha superato quota 400 ppm, ed è stato l'anno in cui sono state riscontrate le maggiori temperature da quando ha avuto inizio la sua misurazione sistematica. La comunità scientifica ha espresso chiaramente le sue preoccupazioni riguardo un costante aumento del livello degli oceani, indotto dall'aumento della temperatura e dallo scioglimento dei ghiacciai, la cui velocità risulta essere in costante aumento. La NASA, National Aeronautics and Space Administration, ha affermato che la quantità di ghiaccio perso dall'Antartide si è triplicato dal 2012 fino a raggiungere quota 241 bilioni di tonnellate per anno [2]. Nonostante il consenso della comunità scientifica nell'affermare che il riscaldamento globale sia provocato da fattori antropici e la firma del trattato di Parigi sul clima del 2015, alcuni governi sono riluttanti e contrari a ridurre le emissioni di gas serra [1].

I fenomeni alluvionali sono in continuo aumento specialmente negli Stati Uniti, l'innalzamento del livello oceanico entro il 2100 sottoporrà a frequenti inondazioni le aree che si attestano ad una bassa quota sul livello del mare. Le aree costiere atlantiche sono maggiormente vulnerabili a causa di fenomeni di erosivi; mentre la costa del Pacifico in generale risulta essere meno vulnerabile a causa della sua maggiore elevazione sul livello del mare e resistenza all'erosione [3]. I fenomeni alluvionali in zone costiere possono essere distinti in "marine flooding" e "groundwater flooding", i primi dovuti ad esondazione di corpi idrici superficiali, mentre i secondi sono dovuti ad una risalita del livello di falda al di sopra del piano campagna; quest'ultimo è caratterizzato da un'estensione temporale che può essere dell'ordine di settimane o mesi e da una torbidità, in generale, contenuta rispetto al "marine flooding".

L'innalzamento del livello oceanico rappresenta un pericolo crescente per comunità costiere, infrastrutture ed ecosistemi. Il livello oceanico potrebbe aumentare di 0.18 – 0.48 m entro il 2050 e di 0.5-1.4 m entro la fine del secolo [4]. Le zone costiere caratterizzate da una limitata elevazione topografica rispetto al livello degli oceani saranno soggette ad un incremento di inondazioni marine ed al contemporaneo incremento del livello di falda, l'acqua del sottosuolo potrà risalire in alcune aree al di sopra della superficie del suolo in relazione alla topografia [4]. Questi fenomeni assumono particolare intensità nel caso si abbia un evento piovoso intenso in concomitanza con alta marea.

Nell'area di New York si è osservato un innalzamento del livello oceanico quasi doppio rispetto alla media globale, dal 1900 è stato registrato un innalzamento medio decennale pari a 0.03 m (per

un totale di 0.33 m), a fronte di un innalzamento medio globale per decennio pari a 0.0127-0,0178 m nel medesimo periodo [5].

La gestione delle acque superficiali e profonde è una tematica su cui la conoscenza tutt'ora risulta limitata, non si è ancora in grado di fare previsioni accurate ed identificare appropriati sistemi di gestione. La gestione della risorsa idrica è solo una parte dei problemi ambientali e socio-economici che interessano le aree urbane [6]. Mancano ad oggi studi che correlino fattori sociali ed economici a problematiche idrogeologiche. La ricerca nel settore idrogeologico rimane essenziale, ma se non contestualizzata, non riuscirà ad affrontare le problematiche di una società in continua evoluzione in un contesto caratterizzato da cambiamenti climatici in atto [1].

1.2 Introduzione

La finalità di questo elaborato è quello di analizzare e ricostruire le dinamiche di interazione che caratterizzano e governano acquiferi in prossimità di rilevanti corpi idrici superficiali, ed in particolare acquiferi costieri, attraverso la realizzazione di un modello numerico del flusso sotterraneo dell'acquifero superficiale della città di Hoboken, New Jersey, area che si colloca lungo l'estuario del fiume Hudson.

Questo elaborato nasce dalla collaborazione tra il DIATI, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, del Politecnico di Torino e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dell'Oceano di Stevens Institute of Technology, presso il quale è stata svolta la presente tesi. Lo Stevens Institute of Technology sorge nell'area di Hoboken. L'area di Hoboken è soggetta a fenomeni di allagamento, le cui dinamiche sono oggetto di studio di svariati progetti di ricerca finalizzati ad approfondire la conoscenza e la comprensione di tali fenomeni [7].

Per la caratterizzazione e la modellazione del flusso sotterraneo dell'acquifero superficiale dell'area di Hoboken si è ricorso principalmente all'utilizzo dei software ArcGis, per la ricostruzione della topografia, e ModelMuse, interfaccia grafica opensource del software MODFLOW-2005, per la realizzazione del modello numerico. L'acquifero è stata suddiviso in tre

strati, uno strato di copertura superficiale, uno strato intermedio ed infine uno strato roccioso di fondo, le cui profondità sono state ottenute attraverso l'analisi di sondaggi geognostici implementati ed elaborati in ArcGIS. Le informazioni topografiche ottenute sono state utilizzate per la costruzione del dominio del modello numerico. Le condizioni al contorno sono state ricavate da misurazioni del livello di falda e dall'analisi dell'andamento della marea, mentre i termini di ricarica sono stati ottenuti elaborando gli eventi piovosi ed ipotizzando la riparazione di parte del sistema fognario. Per la calibrazione del modello, atta ad individuare il valore di conducibilità idraulica maggiormente rappresentativo dell'acquifero oggetto di studio, i valori del livello di falda simulati sono stati confrontati con i livelli misurati in campo all'interno dei piezometri presenti nell'area di Hoboken.

Il modello è stato utilizzato per indagare il comportamento della falda, in stato stazionario e transitorio, in assenza ed in presenza di afflussi meteorici al variare delle condizioni al contorno. Sono state eseguite delle simulazioni predittive ipotizzando un incremento del livello idrico del fiume Hudson e la riparazione di parte del sistema fognario, la quale implica un innalzamento del livello di falda, poiché esso nel contesto odierno rappresenta una condizione limitante nell'incremento del livello di falda in gran parte dell'area di studio, a causa di infiltrazione di acqua di falda al suo interno.

Nel *Capitolo 2 Materiali e metodi* vengono introdotti l'area di studio, la geologia superficiale e profonda, i sondaggi geognostici utilizzati per ricostruire la stratigrafia, la strumentazione utilizzata per il monitoraggio del livello di falda e le misurazioni di campo, ed infine l'analisi dello storico del livello idrico del fiume Hudson finalizzata ad una stima dell'evoluzione del livello in scenari futuri.

Nel *Capitolo 3 Modellazione del flusso sotterraneo* vengono presentate le equazioni di flusso che governano gli acquiferi, le principali caratteristiche del software MODFLOW-2005, la risoluzione numerica alle differenze finite, la griglia di calcolo utilizzata, i tipi di condizioni al contorno e i pacchetti utilizzati per implementarle all'interno del modello, la stima della conducibilità idraulica, le condizioni al contorno e di ricarica implementate.

Nel *Capitolo 4 Risultati e discussione* vengono riportate l'analisi e l'elaborazione dei dati raccolti, la ricostruzione stratigrafica e le simulazioni svolte. Per la ricostruzione stratigrafica si è ricorso all'utilizzo di tecniche di interpolazione spaziale; mentre per la modellazione del flusso

sotterraneo, finalizzato ad individuare le zone suscettibili a fenomeni di allagamento dovuti alla risalita dell'acqua di falda al di sopra del piano campagna, sono stati considerati svariati scenari.

2 Materiali e metodi

In questo capitolo vengono presentati l'area di studio, i dati raccolti e la strumentazione utilizzata per le misurazioni di campo volte alla realizzazione di un modello numerico che rappresenti la risposta dell'acquifero a forzanti esterne nell'area di Hoboken in determinate condizioni, quali ad esempio la concomitanza di un evento piovoso di notevole entità ed alta marea.

Lo sviluppo del modello si è basato su diverse tipologie di dati raccolti e misurazioni di campo eseguite nell'ambito della presente tesi. In particolare, sono state raccolte le seguenti informazioni:

- Dati pluviometrici e pressione barometrica, monitorati in continuo dalla stazione meteorologica Pier 84, situata nell'Hudson River Park, nello stato di New York a ridosso del fiume Hudson (Figura 2-1 (a));
- Misurazione in continuo del livello idrico di falda e della temperatura all'interno dell'area di studio attraverso l'installazione di trasduttori di pressione in piezometri di osservazione;
- Misurazione del livello di falda tramite freatimetro;
- Andamento del livello idrico del fiume Hudson, monitorato in continuo dalla stazione 8518750 The Battery, New York City (Figura 2-1 (a));
- Stratigrafie derivanti da sondaggi geognostici.

Per quanto riguarda le misurazioni in campo, sono stati installati sei trasduttori di pressione in piezometri dislocati all'interno dell'area di interesse, i quali misurano in continuo il carico idraulico. Periodicamente si è proceduto alla raccolta dei dati registrati dai trasduttori e ad una verifica della loro attendibilità tramite misurazione manuale del carico idraulico attraverso l'utilizzo di un freatimetro.

Lo sviluppo del modello e la fase di raccolta dati sono ancora in corso, oltre alle misurazioni svolte direttamente in campo dal dipartimento dello Stevens Institute of Technology, è in atto una collaborazione con la municipalità di Hoboken e l'NJDEP, New Jersey Department Environmental Protection, i quali stanno eseguendo in parallelo campagne di misurazioni ed analisi dello stato attuale della geologia e della falda superficiale. Questi enti sono interessati al miglioramento della loro conoscenza del territorio per poter prevenire gli effetti di eventi climatici estremi ed

individuare gli interventi più idonei atti a ridurre la palese vulnerabilità dell'area di Hoboken. La Federal Emergency Management Agency (FEMA) ha realizzato una mappa di rischio alluvione dell'area di Hoboken in cui si attesta che all'incirca il 79% dell'area è soggetta a rischio di inondazione.

2.1 Area di studio

L'area di Hoboken (figura 2-1) fa parte della contea di Hudson e si trova nell'area nord-est dello stato di New Jersey, USA. I confini dell'area di studio (figura 2-1(b)) sono:

- l'estuario del fiume Hudson ad est;
- 18th Street a nord;
- il tratto ferroviario Hudson-Bergen Light Rail, a sud e ad ovest

L'estensione di Hoboken è all'incirca di 3 km² con una popolazione di circa 56.635 abitanti, è un'area fortemente urbanizzata. Prima dell'urbanizzazione, era per lo più un'area umida; a partire dal XVII secolo, a seguito dell'avvio di attività commerciali e l'aumento di popolazione nell'area, si è verificata una progressiva urbanizzazione, che ha comportato una riduzione dell'estensione delle aree umide. A tal fine sono state costruite paratie, strade ed infrastrutture. Le aree umide svolgevano un ruolo ecologico fondamentale, riuscendo a contenere gli effetti di eventi climatici estremi [8]. I volumi di acqua che venivano accumulati da queste aree a seguito della costruzione di ambienti urbani, a scarsa permeabilità, ora scorrono superficialmente fino a raggiungere adiacenti corpi idrici superficiali. I danni causati dall'uragano Katrina, agosto 2005, nello stato della Louisiana ed in particolare nell'area di New Orleans ha riacceso l'interesse della comunità scientifica sull'importanza di queste aree all'interno di zone urbane [9]. La diminuzione progressiva delle aree umide in quest'area, che si colloca lungo il delta del fiume Mississippi, è dovuta alla diminuzione del tasso di trasporto solido del fiume, imputabile alla costruzione di argini fluviali artificiali e ad interventi finalizzati a rendere navigabile il canale fluviale [10].

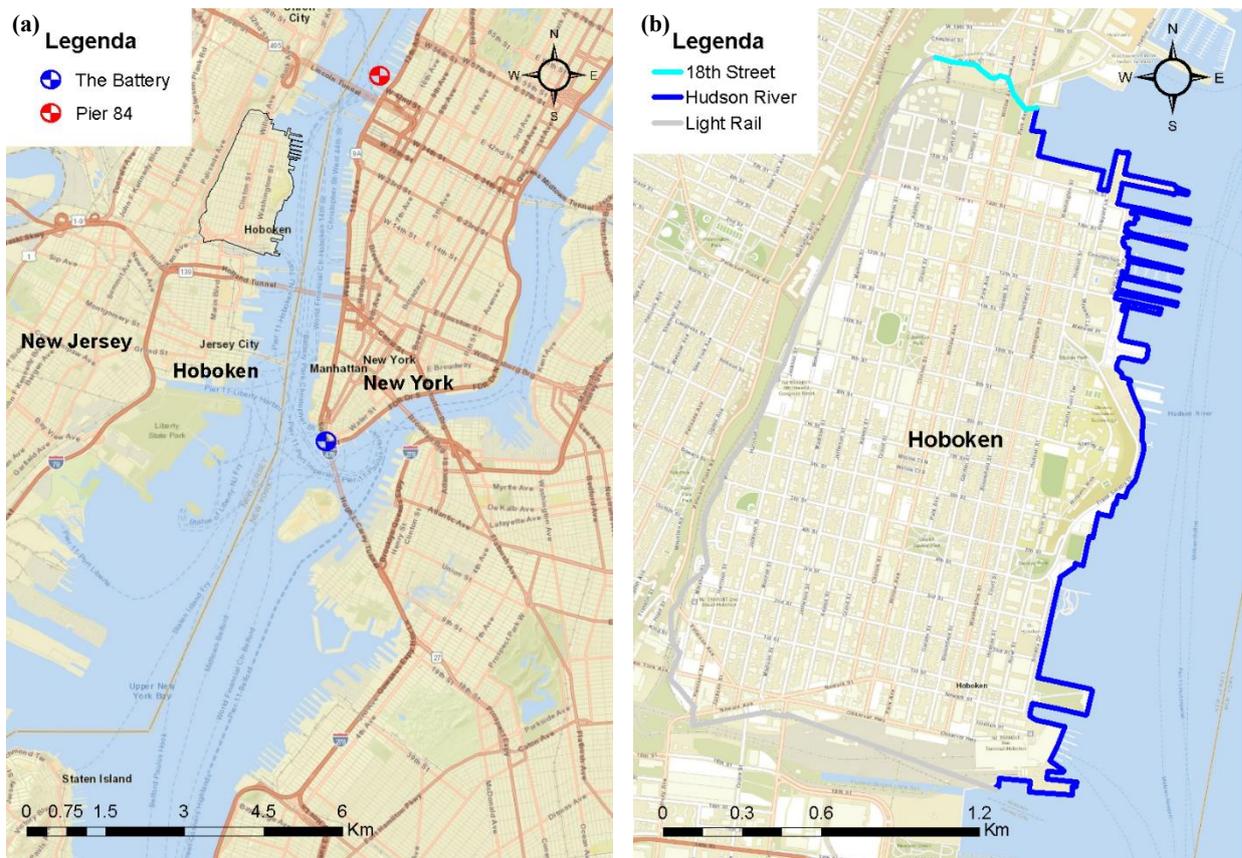


Figura 2-1: (a) area di studio delimitata da linea continua e stazioni meteorologiche, scala 1:50.000; (b) confini area di studio, scala 1:10.000

Per la posizione, l'eterogeneità geologica, la forte urbanizzazione, l'inquinamento del suolo, la limitata estensione areale, Hoboken è stata considerata in molti studi alla stregua di un laboratorio urbano su cui svolgere indagini e trarre conclusioni estendibili ad altre casistiche.

L'area di studio è caratterizzata da una bassa elevazione rispetto al livello del mare e perciò risulta essere soggetta a fenomeni di inondazione durante la stagione delle tempeste atlantiche che si estende dal mese di giugno al mese di novembre. L'area è stata interessata negli ultimi anni da due eventi climatici estremi, l'uragano Irene (28 Agosto 2011) e l'uragano Sandy (29 Ottobre 2011), i quali hanno provocato ingenti danni alle infrastrutture e hanno costretto la popolazione ad una temporanea evacuazione. L'impatto dell'uragano Irene è stato amplificato dalla concomitanza di un evento piovoso estremo, durante il quale sono stati registrati 200 mm di pioggia nell'arco di 24 ore. A seguito degli ingenti danni causati dall'uragano Sandy è stato indetto dall'U.S. government nel 2013 il progetto Rebuild by Design (RBD), con lo scopo di aumentare la resilienza delle regioni

colpite dalla calamità. Una delle proposte vincitrici ha come oggetto l'area di Hoboken e prevede la realizzazione di cosiddette "Green Infrastructures", quali ad esempio aree drenanti e tetti verdi, atte ad aumentare nel medio-lungo termine la capacità di drenaggio in modo da far fronte ad eventi climatici estremi [7].

Hoboken ricade all'interno del quadrilatero Jersey City, il quale occupa l'area nord-est dello stato del New Jersey, includendo le contee di Hudson ed Essex; questa è un'area mista commerciale, industriale e residenziale. Il quadrilatero Jersey City si estende fino al confine tra lo stato del New Jersey e le contee di Kings e Richmond dello stato di New York. La maggior parte dell'area è coperta da depositi non consolidati di vario spessore risalenti al Pleistocene [11]. Nel 1883 Nelson Horatio Darton, geologo che lavorò per l'USGS (United States Geological Survey) pubblicò un articolo su rocce e minerali individuati in alcuni siti in prossimità di New York City, nel quale identificò un'area, Castle Hill in Hoboken, caratterizzata da uno strato di rocce affioranti in superficie di spessore variabile tra 0.6 e 9 m, oggi nota come "Castle Point".

La stratigrafia può essere essenzialmente rappresentata dall'alternarsi di tre strati di profondità e spessore variabile:

- uno strato di copertura di composizione molto variabile (terreno di riporto contenente sabbia, ghiaia, argilla ed anche materiale di natura antropica, come mattoni e materiale da costruzione);
- uno strato intermedio, costituito in gran parte da materiale trasportato negli anni dal fiume Hudson, il quale ha sottoposto l'area di Hoboken a continui cicli di sedimentazione-erosione, in cui è stata individuata un'alta percentuale di sabbia limosa;
- uno strato di fondo costituito da rocce più o meno fratturate, perlopiù serpentino e arenaria.

Lo strato di fondo è costituito perlopiù dalla formazione Stockton, composta da rocce sedimentarie, da una significativa frazione di serpentino, roccia metamorfica, e da "Manhattan Schist", roccia scistosa metamorfica a grana medio-grossa, quest'ultima sottende l'area confinante con il fiume Hudson. La formazione Stockton è la formazione più antica del "New Jersey's Newark Supergroup rocks", che include rocce sedimentarie risalenti al Triassico Superiore ed al Giurassico Inferiore [12].

- Depositi fluviali deltizi (delta deposits), riconducibili alla glaciazione avvenuta nel Pleistocene, di composizione variabile;
- Rahway Till, derivante dalla disgregazione di argilliti e arenarie, generalmente caratterizzato da uno spessore inferiore ai 10 m;
- Depositi fluviali (estuarine deposits), accumulo di sedimenti trasportati dal fiume Hudson, caratterizzata da una maggiore presenza di materiale organico nella zona più occidentale.

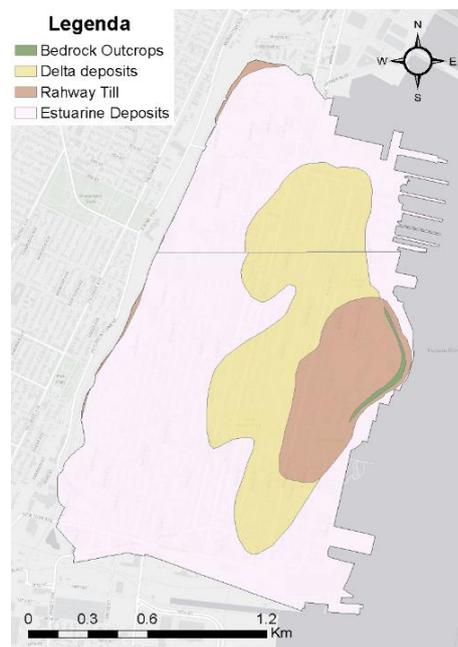


Figura 2-3: geologia dello strato intermedio ed affioramento roccioso

In figura 2-4 si riportano rispettivamente l'elevazione dell'area di studio e l'uso del suolo. L'elevazione dell'area di interesse varia tra 0.5 e 30.7 m sul livello del mare rispetto al sistema di riferimento NAVD 88, North American Vertical Datum del 1988. L'area a maggior elevazione si colloca lungo la costa, nell'area di Castle Point su cui sorge parte del campus dello Stevens Institute of Technology, mentre la maggior parte della superficie restante si attesta a pochi metri sul livello del mare.

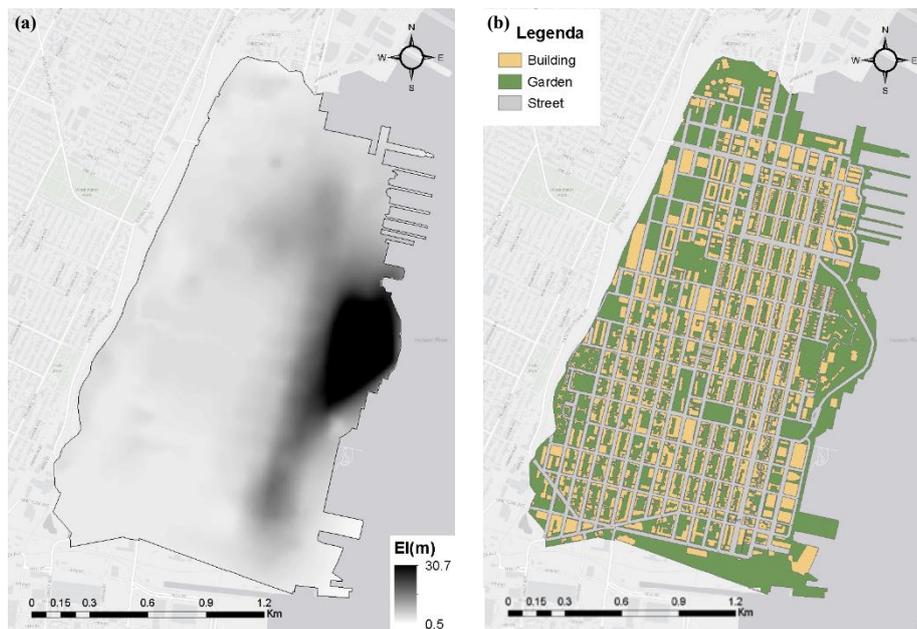


Figura 2-4: (a) Digital elevation model dell'area di studio, (b) uso del suolo

2.2 Monitoraggio delle acque superficiali e sotterranee

Nell'area di Hoboken sono stati realizzati a diverse distanze dalla linea di costa dei piezometri di monitoraggio, (figura 2-5 (a)), per monitorare l'andamento della superficie piezometrica. A seguito di misurazioni del livello idrico in sito si è giunti alla conclusione che non tutti questi piezometri potessero fornire dati attendibili a causa di fattori di alterazione locali, ad esempio il carico idraulico misurabile nel piezometro GW-7, che si colloca nell'area nord-ovest di Hoboken, è risultato essere alterato dalla vicinanza con l'impianto di trattamento delle acque reflue. In figura 2-5(b) si riportano i piezometri utilizzati per il monitoraggio continuo della superficie piezometrica, attraverso l'installazione di trasduttori di pressione. Dopo aver raccolto una mole di dati sufficientemente rappresentativa della stagionalità, degli effetti indotti da eventi piovosi di diverse entità e dell'andamento del fiume Hudson, i trasduttori verranno trasferiti in altri piezometri.

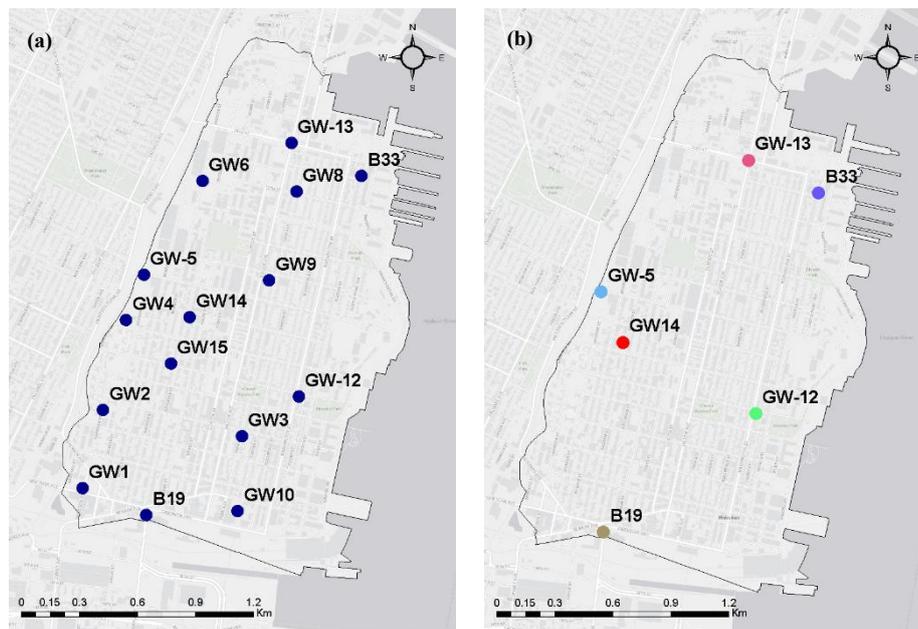


Figura 2-5: (a) piezometri di monitoraggio presenti nell'area di studio, (b) piezometri di monitoraggio selezionati per l'installazione dei trasduttori di pressione

La rete fognaria dell'area di Hoboken risulta notevolmente compromessa, la sua costruzione è avvenuta nei primi anni del XIX secolo e non sono state svolte azioni di manutenzione o sostituzione atte a limitare il danneggiamento dovuta all'usura indotti da fattori stress, quali traffico veicolare ed agenti climatici. Oltre il 50% del sistema fognario con una probabilità pari al 47% è soggetto a significanti danni strutturali; in figura 2-6 si riporta la probabilità di danneggiamento indicata come RF, "Risk of Failure", individuata sulla base di parametri che tengono conto della struttura del sistema fognario (dimensioni e materiale di costruzione delle tubazioni), geologia e fattori di stress (livello di falda e traffico veicolare) [13]. Il danneggiamento del sistema fognario comporta interazione con l'acqua di falda; nelle aree in cui la superficie piezometrica si colloca al di sotto della rete fognaria avviene percolazione di refluo, mentre nelle aree in cui la superficie piezometrica si colloca al di sopra della rete avviene infiltrazione di acqua di falda all'interno delle tubazioni. Il maggior tasso di infiltrazione si ha nella zona sud-ovest, in cui la rete fognaria è particolarmente danneggiata. L'infiltrazione provoca un notevole incremento dei volumi di acqua che attraversano il sistema fognario, cui consegue un aumento della frequenza degli azionamenti del sistema che convoglia nel fiume Hudson l'eccesso della portata trattabile dal sistema di trattamento di acque reflue presente a valle della rete fognaria [14]. Le infiltrazioni dell'acqua di falda all'interno del sistema fognario, anche se rappresentano ovviamente un aspetto

negativo, permettono il contenimento dell'innalzamento del livello freatico; se esse venissero riparate si avrebbe un conseguente innalzamento del livello di falda con probabili conseguenti fenomeni di risalita superficiale [14].



Figura 2-6: mappa della probabilità di danni strutturale della rete fognaria , con RF 'Risk of Failure' si indica la probabilità di danneggiamento [13]

2.3 Analisi dei sondaggi geognostici

In natura i terreni sono costituiti da una più o meno accentuata eterogeneità granulometrica, in funzione delle distribuzioni dei vari componenti al suo interno viene assegnata una differente denominazione. Ad esempio, si consideri un terreno costituito da 5 differenti componenti (sabbia, ghiaia, etc...) A, B, C, D , E e siano $P_1 > P_2 > P_3 > P_4 > P_5$ le rispettive frazioni volumetriche, il terreno avrà come nome principale quello corrisponde alla frazione a maggiore concentrazione ,

A, seguito dai restanti, se P della rispettiva componente è compreso tra il 25% ed il 50% il nome della componente sarà preceduto da “con”, se P risulta essere compreso tra il 25% ed il 10% si aggiunge il suffisso “oso/osa”, se P si attesta tra il 10% ed il 5% oltre al suffisso “oso/osa” il nome della componente sarà preceduta da “debolmente” ed infine se P è al di sotto del 5% la componente non viene citata (esempio: terreno costituito da 40% di ghiaia, 30% di limo, 20% di sabbia, 9 % di argilla, 1% ciottoli sarà denominato ghiaia con limo sabbiosa debolmente argillosa).

Per la ricostruzione della stratigrafia dell'area di Hoboken, ed in particolare per individuare la profondità dello strato di copertura e del basamento roccioso sono stati analizzati i sondaggi eseguiti da diverse compagnie nell'arco temporale che va dal 2004 fino al 2018. In figura 2-7, si riportano i sondaggi considerati e le compagnie che li hanno eseguiti:

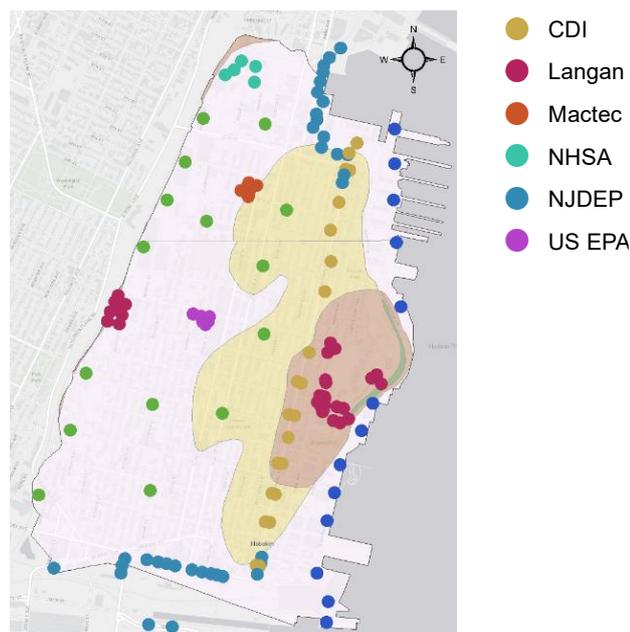


Figura 2-7: sondaggi stratigrafici nell'area di studio, suddivisi in base alla compagnia o ente che ha eseguito l'indagine

Sono stati individuati 5 tipi di suolo e 2 tipi di strati rocciosi:

- strato superficiale di riempimento o di copertura, composto da sabbie, ghiaie, limi, argille e roccia. Questo strato include anche materiale di natura antropica come cemento, mattoni, legno,

vetro. È caratterizzato da uno spessore variabile tra 0,6 e 10,6 m rispetto alla quota del piano campagna;

- terreno con struttura granulare composto in gran parte da depositi fluviali di sabbia grossolana e fine, con contenuto variabile di ghiaie, limi e argille; classificabile come SM, sabbia limosa, o SP, sabbia ghiaiosa, secondo l'USCS, Unified Soil Classification System. In alcuni punti, caratterizzati dall'assenza di strato di copertura, esso costituisce lo strato superficiale, la sua profondità varia da circa 1,8 a 23 m;
- terreno con struttura fine-granulare composto da argille e limi in varie percentuali, con la presenza in alcune aree di torba e materiale organico, ma anche ghiaie e sabbie. Questo tipo di suolo in base alle diverse proporzioni delle componenti è riconducibile a tre categorie, CL, argille inorganiche, ML, limi-argillosi e PT, torbe. Esso si posiziona al di sotto dello strato di copertura o al di sotto del terreno con struttura granulare fino ad una profondità di circa 30 m rispetto al piano campagna;
- deposito glaciale, strato fine o fine-granulare, caratterizzato percentuali variabili di ghiaia e materiali fini. La profondità a cui è stato ritrovato è molto variabile, tra 6 e 30 m;
- basamento roccioso deteriorato, costituito da arenaria friabile e terreno-fine granulare in varie frazioni. Esso è stato individuato al di sotto del terreno granulare, del terreno fine-granulare e del deposito glaciale.
- basamento di arenaria, strati di arenaria fine e grossolana caratterizzati da frazioni variabili di quarzo e feldspati. Individuato a profondità variabili tra 5 e 30 m al di sotto della superficie del terreno;
- basamento di serpentino, composto da serpentino di colore tra il verde scuro e il verde chiaro, più o meno fratturato. Ritrovato a profondità tra i 10 m e i 15 m.

In figura 2-7, si può notare una mancanza di dati nella zona centrale e nell'area posta a sud-ovest, per ovviare alla mancanza di informazioni si è svolta una ricerca nella documentazione della NJDEP, da cui sono stati ottenuti i seguenti dati:

- profondità del bottom dello strato di copertura nella zona ovest, in prossimità del tratto ferroviario, all'incirca 4 m;
- profondità media del basamento roccioso nell'area centrale pari a 7 m.

Inoltre, da letteratura si è riscontrata una profondità media del basamento roccioso lungo la linea di costa pari a 20 m, mentre per far fronte alla mancanza di dati riguardanti la profondità dello strato di copertura nelle zone centrali è stato assegnato un valore medio sulla base dei dati noti dai vari sondaggi. I nuovi dati sono stati riportati in figura 2-8, ed indicati come *Document Data*, profondità del basamento roccioso lungo la linea di costa, e *Synthetic Data*, dati ottenuti da medie e ricerca nella documentazione l'ente NJDEP.

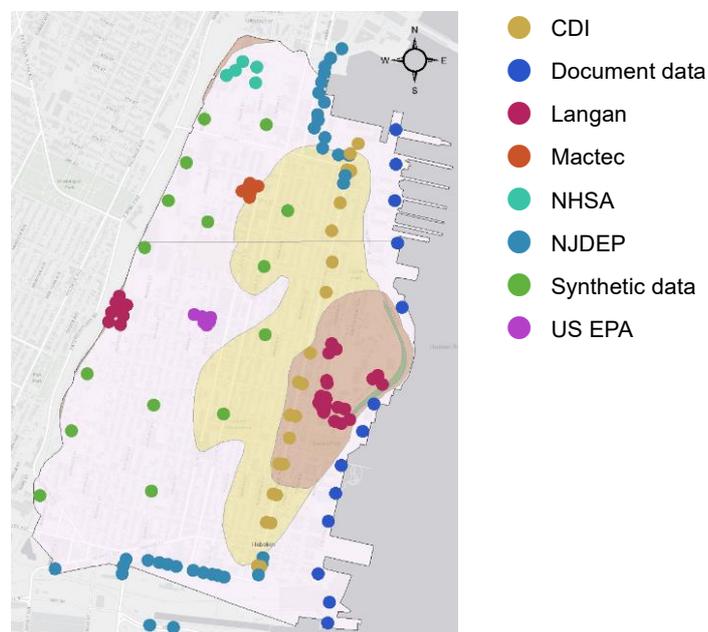


Figura 2-8: sondaggi stratigrafici nell'area di studio, inclusione dei dati sintetici e dei dati ottenuti da documentazione NJDEP

2.4 Monitoraggio del livello di falda

Al fine di ottenere un monitoraggio continuo del carico idraulico sono stati installati sei trasduttori di pressione; all'interno dei piezometri riportati in figura 2-5 (b). Il carico idraulico rappresenta l'energia totale per unità di peso posseduta da una particella d'acqua:

$$h = \frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{g\rho} \quad (2.1)$$

in cui h è il carico totale che risulta pari alla somma di tre termini la componente cinetica, la componente geodetica e la componente di pressione; all'interno dei sistemi acquiferi la componente cinetica è trascurabile rispetto agli altri due termini, poiché la velocità dell'acqua nel sottosuolo è molto bassa [15]. Perciò il carico idraulico si può esprimere come:

$$h = z + \frac{p}{g\rho} = z + h_p \quad (2.2)$$

in cui z rappresenta l'altezza geodetica del punto in cui viene misurato il carico idraulico e h_p l'altezza idrostatica [15]. Per la misurazione del carico idraulico è stato utilizzato un freatimetro. Il freatimetro o sonda per la misurazione del livello idrico (figura 2-9) è composto da un cavo elettrico inestendibile marcato con un incremento graduale in cm, montato su un rullo portacavo in materiale plastico, munito di una maniglia per il trasporto, una manopola per l'avvolgimento del cavo e una vite di bloccaggio del tamburo. Al capo del cavo elettrico è presente una sonda piezoelettrica (o puntale) che al contatto con la superficie dell'acqua emette un segnale acustico.



Figura 2-9: freatimetro o sonda per la misurazione del livello idrico

Attraverso l'utilizzo del freatimetro è stata misurata la soggiacenza, h_w , profondità dell'acqua all'interno del piezometro; dalla quale, nota la quota geodetica del piano campagna z_t è stato

calcolato il livello piezometrico (H), quota della falda sul livello del mare, che coincide con il carico idraulico in un punto dell'acquifero (figura 2-10) [15]:

$$H = z_t - h_w = h = z + h_p \quad (2.3)$$

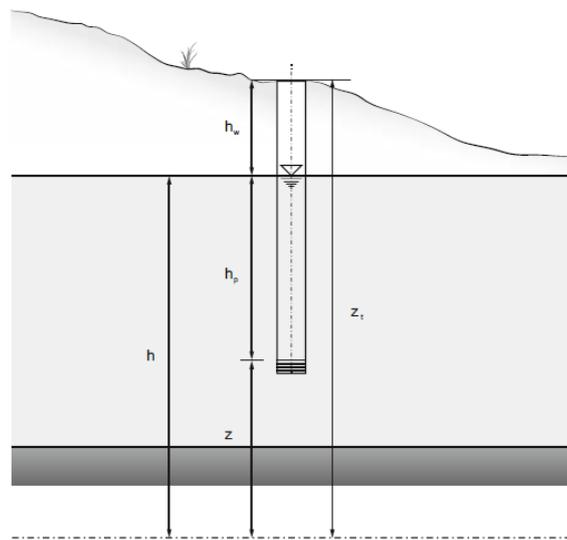


Figura 2-10: misura del carico idraulico (Di Molfetta, Sethi, 2012)

I sensori utilizzati misurano in continuo la pressione assoluta e la temperatura. Sono stati adoperati sensori HOBO U20L-004 (Onset U.S.A.), figura 2-11, trasduttori in polipropilene ampiamente utilizzati per monitorare variazione di livelli idrici in diversi contesti, fiumi, laghi, aree marittime, e acque sotterranee. In *Appendice A* si riportano le specifiche tecniche del sensore.



Figura 2-11: trasduttore di pressione HOBO U20L-004

Il misuratore deve essere posizionato al di sotto del livello piezometrico; esso registra la pressione assoluta agente sulla faccia inferiore, data dalla somma della pressione esercitata dalla quota parte dell'acqua sovrastante il sensore e dalla pressione barometrica, esercitata dalla colonna d'aria sovrastante. La pressione assoluta è stata poi convertita nel corrispettivo livello di falda tramite l'utilizzo del software HOBOWare Pro Software. Il software previo inserimento di un livello idrico di riferimento, ottenuto in campo tramite l'utilizzo di un freatimetro, correla la variazione di pressione registrata dal sensore alla variazione del livello di falda. Per ottenere una misura accurata del livello idrico di falda bisogna sottrarre alla pressione assoluta la pressione barometrica, essa varia in funzione dell'altitudine e del clima. Nel presente elaborato si è fatto riferimento alle pressioni registrate dalla stazione metereologica Pier 84, situata nell'Hudson River Park, New York City, a circa 3 Km da Hoboken, la quale fornisce l'andamento della pressione in tempo reale. Questa stazione è stata selezionata dopo il confronto della pressione registrata in vari sensori nei dintorni del luogo di interesse, da cui è emerso che le differenze di pressione registrate dai vari sensori sono trascurabili.

Per permettere il download dei dati registrati il sensore viene estratto, viene sganciata la parte superiore e viene collegato ad un computer tramite apposito adattatore, figura 2-12.

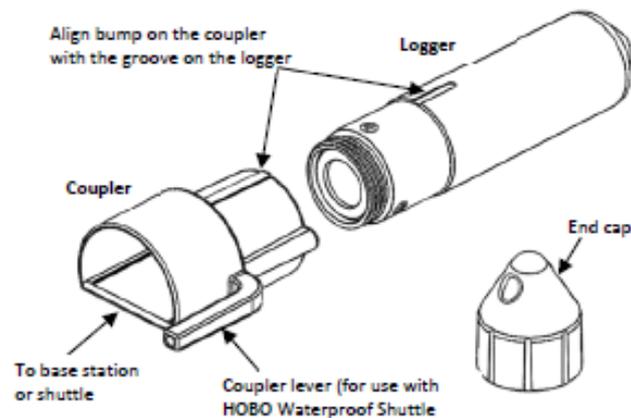


Figura 2-12: sensore HOBOWare Pro U20L-004 ed adattatore che permette collegamento USB

Durante le misurazioni di campo, figura 2-13, sono state eseguite le seguenti operazioni:

- misura del livello piezometrico tramite freatimetro;
- settaggio del sensore in sito tramite accoppiamento con laptop;
- fissaggio del sensore al di sotto del livello piezometrico tramite cavo d'acciaio collegato tra il top del piezometro e la testa del sensore;
- estrazione del sensore e download dei dati su laptop;
- riposizionamento del sensore al di sotto della tavola d'acqua.

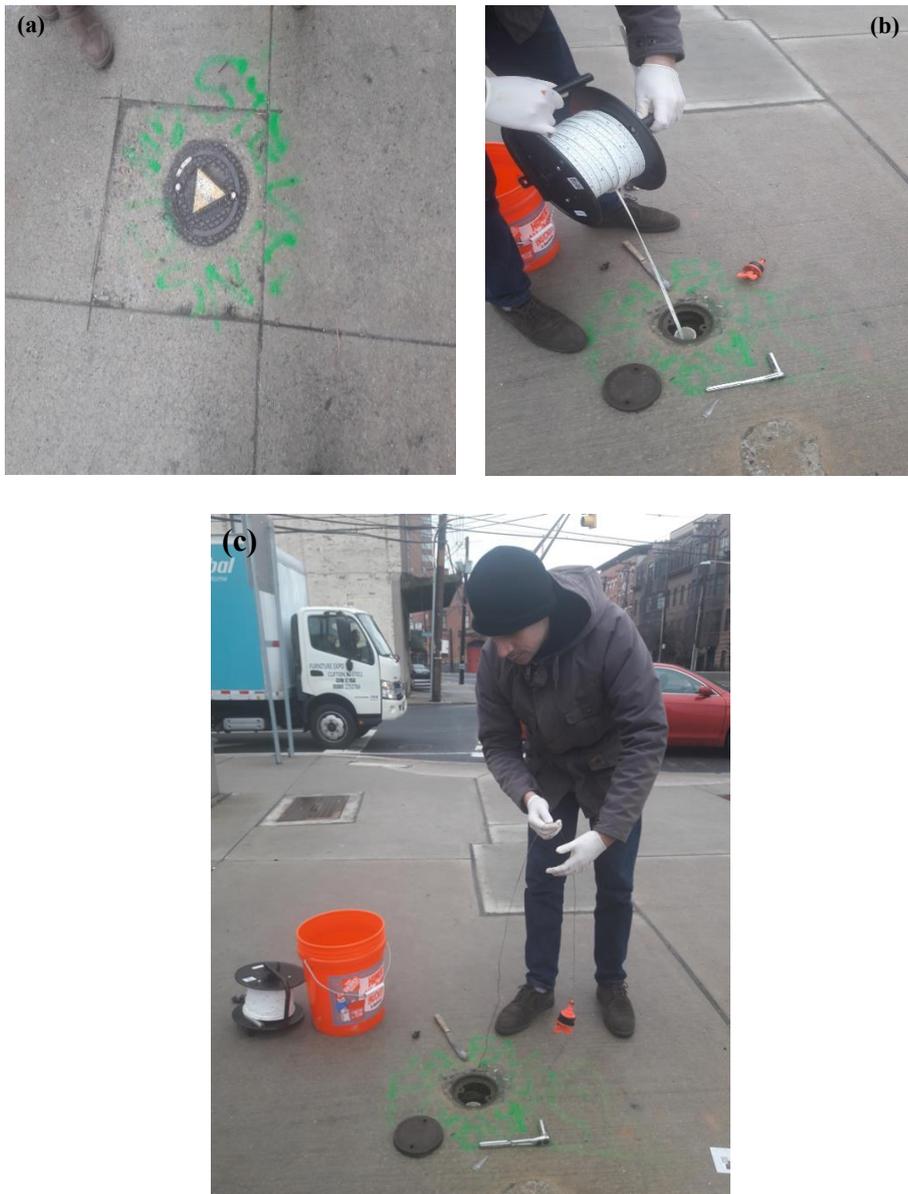


Figura 2-13: misurazioni in campo, (a) piezometro di osservazione contrassegnato con bomboletta spray, (b) misura manuale del livello di falda tramite freatimetro, (c) estrazione del trasduttore HOBO U20L

2.5 Oscillazioni del fiume Hudson

Per fare delle simulazioni dei possibili scenari futuri ed individuare le zone suscettibili ad una risalita superficiale dell'acqua di falda si è stimato l'incremento del fiume Hudson, analizzando i dati medi mensili del livello di marea registrati dalla stazione 8518750 The Battery, NY, forniti da NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, in un lasso temporale che si estende dal 1860 ad oggi [16]. In questo lasso temporale si è avuto un incremento medio annuale del livello idrico pari a $2,84 \pm 0,09$ mm, considerando un intervallo di confidenza pari al 95 %. I dati del livello medio mensile sono stati elaborati in Matlab per estendere le previsioni sino all'anno 2100 (figura 2-14), in cui ipotizzando un trend lineare è stato calcolato un incremento del livello idrico pari all'incirca a 0,25 m.

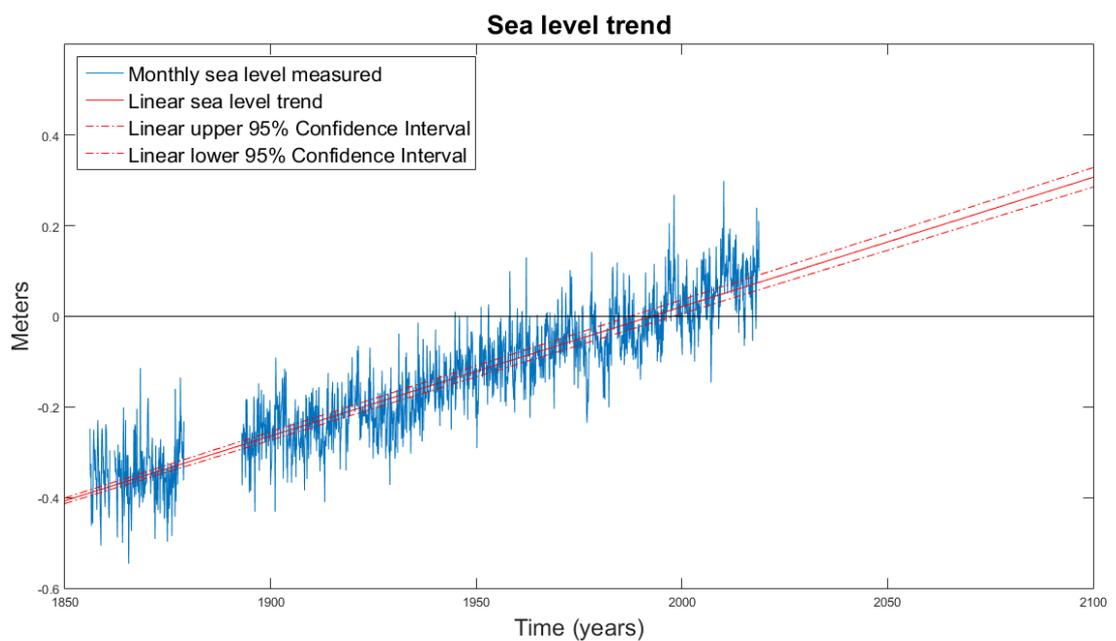


Figura 2-14: innalzamento del livello idrico del fiume Hudson, trend lineare ed intervalli di confidenza

3 Modellazione del flusso sotterraneo

Per la modellazione numerica del flusso sotterraneo è stato utilizzato ModelMuse, interfaccia grafica opensource del software ModFlow, utilizzato dall'USGS. La prima versione di Modflow risale al 1983; esso è nato per riunire e consolidare le conoscenze sulla modellazione del flusso sotterraneo. Modflow, inizialmente, fu ampiamente utilizzato dall'USGS, United States Geological Survey, per poi divenire nel 1990 il software maggiormente impiegato a scala globale. Nel presente elaborato si è ricorso all'utilizzo di Modflow-2005, il quale modella il flusso sotterraneo attraverso l'utilizzo di diverse subroutine o pacchetti.

Modflow è in grado di simulare il flusso in condizioni stazionarie e transitorie all'interno di sistemi di forma irregolare, gli acquiferi possono essere distinti in confinati, non confinati o semi-confinati (delimitati superiormente da una formazione scarsamente permeabile). Può essere simulata l'influenza di fattori esterni, flussi da e verso un sistema di pozzi, fattori di ricarica areali o puntuali, evapotraspirazione, flusso attraverso sistemi di drenaggio, flussi da e verso corpi idrici. È possibile assegnare una conducibilità idraulica ed una trasmissività variabile nello spazio ed anisotropa (con la restrizione di avere le direzioni principali allineate con gli assi della griglia) [17].

L'equazione di flusso che governa il moto all'interno di un mezzo poroso viene generalmente derivata in riferimento ad un volume rappresentativo dell'interno sistema, REV, caratterizzato da una dimensione sufficiente piccola da poter individuare le variazioni delle proprietà macroscopiche ma sufficientemente grande da mediare le variazioni presenti a scala microscopica [15]. L'equazione di flusso viene derivata dall'applicazione al REV del principio di conservazione della massa, della legge di Darcy e dall'equazione di consolidazione del sistema acquifero [15]:

- Conservazione della massa:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho n) = -\nabla(\rho \mathbf{v}) \quad (3.1)$$

con ρ la densità di massa dell'acqua [M/L^3], n la porosità [-], \mathbf{v} le componenti della velocità di filtrazione lungo i tre assi di riferimento [L/T] e t il tempo [T] [15]. L'equazione 3.1 indica che la differenza tra la massa di acqua entrante ed uscente è pari alla differenza di massa d'acqua accumulata all'interno della matrice porosa del REV all'inizio ed alla fine dell'intervallo di tempo considerato.

- Equazione di Darcy:

$$\mathbf{v} = -\mathbf{K}\nabla h \quad (3.2)$$

con \mathbf{K} il tensore della conducibilità idraulica [L/T] ed h il carico idraulico [L]. Essa lega la velocità alle variazioni di carico idraulico.

- Equazione di consolidazione del sistema acquifero

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho n) = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.3)$$

con S_s coefficiente di immagazzinamento specifico [L^{-1}]. Essa indica che a seguito di una variazione di carico idraulico il REV sarà soggetto ad una variazione dello stato tensionale. Nel caso di diminuzione del carico idraulico e quindi espulsione di un volume d'acqua, considerando il principio di Terzaghi delle tensioni efficaci, si avrà un aumento delle tensioni agenti sullo scheletro solido, cui consegue una sua contrazione che comporta la diminuzione della porosità, viceversa, un aumento del carico idraulico comporta un'espansione dello scheletro solido ed un aumento di porosità.

Il flusso tridimensionale in un acquifero omogeneo ed anisotropo, considerando un fluido a densità costante e un sistema di riferimento con direzioni uguali a quelli principali di anisotropia, può essere descritto dalla seguente equazione:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.4)$$

in cui:

- K_{xx} , K_{yy} , e K_{zz} rappresentano i valori della conducibilità idraulica lungo gli assi x,y e z [L/T];
- h è il carico idraulico (energia totale per unità di peso posseduta da una particella di acqua, costituita da tre termini, gravitazionale, di pressione e cinetica, quest'ultimo termine risulta trascurabile a confronto dei precedenti, essendo all'interno dell'acquifero solitamente le velocità molto basse) [L];
- W rappresenta il flusso volumetrico di ricarica o perdita per unità di volume, $W > 0$ indica la presenza di una zona di ricarica (flusso verso il sistema), $W < 0$ indica la presenza di una perdita (flusso verso l'esterno del sistema) [T⁻¹];
- S_s coefficiente di immagazzinamento specifico (definibile come “il volume di acqua liberato per unità di volume dell'acquifero per una diminuzione unitaria di carico idraulico” [15]) [L⁻¹].

Nel caso più generale (ovvero per un acquifero eterogeneo ed anisotropo), i parametri S_s , K_{xx} , K_{yy} , e K_{zz} sono funzioni dello spazio ($S_s = S_s(x,y,z)$, $K_{xx} = K_{xx}(x,y,z)$, $K_{yy} = K_{yy}(x,y,z)$, $K_{zz} = K_{zz}(x,y,z)$) mentre il flusso volumetrico è funzione dello spazio e del tempo ($W = W(x,y,z,t)$). Note le condizioni al contorno, come ad esempio il carico idraulico e/o il flusso lungo il confine dell'area di studio, e le condizioni iniziali, la soluzione dell'eq. 3.4 rappresenta le dinamiche all'interno dell'acquifero oggetto di studio [18]. Nel caso stazionario, steady-state, il termine a destra dell'eq. 3.4 si annulla e la distribuzione dei carichi idraulici dipende esclusivamente dalla conducibilità idraulica e dal flusso volumetrico.

La risoluzione analitica dell'equazione 3.4 è possibile per sistemi acquiferi alquanto semplici, perciò al fine di ottenere una soluzione approssimata, si adottano diversi sistemi di risoluzione numerica. Modflow utilizza un sistema di risoluzione alle differenze finite, in cui il sistema viene risolto in un numero determinato di punti nello spazio e nel tempo, denominati nodi, corrispondenti al punto centrale di ogni cella. Modflow utilizza una griglia di calcolo, suddivisa in celle, la cui posizione è descritta in termini di righe, colonne e strati (figura 3-1).

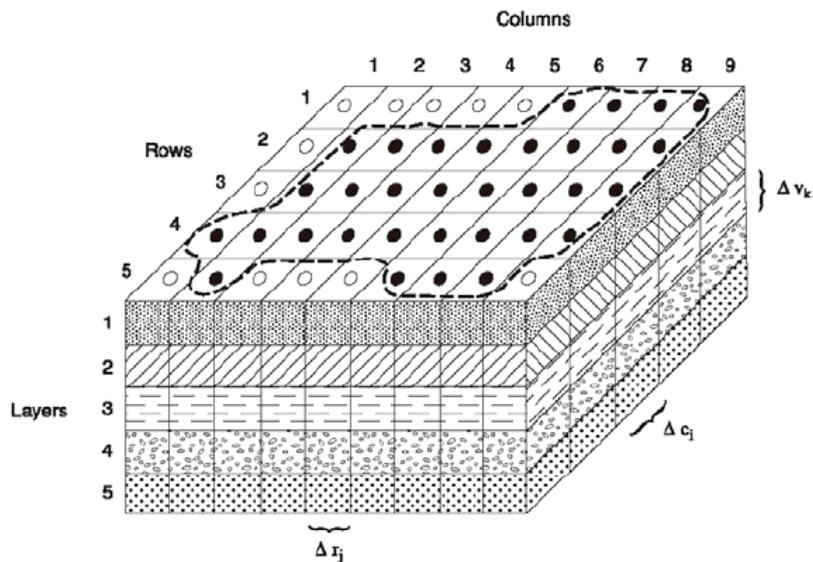


Figura 3-1: griglia di calcolo utilizzata dal software Modflow(Harbaugh,2005)

in cui:

- la terna i,j,k definisce la posizione della cella rispettivamente per: righe, colonne e strati (per esempio, la posizione 1,1,1 individua l'angolo più lontano in alto a sinistra);
- la linea tratteggiata individua il contorno del sistema acquifero;
- i punti neri individuano le celle attive;
- i punti bianchi individuano le celle inattive;
- $\Delta x_i, \Delta c_j, \Delta v_k$, indicano le dimensioni delle celle lungo l'asse x,y,z.

Le condizioni al contorno applicabili si dividono in tre tipologie:

- Condizione di Dirichlet o condizione del primo tipo:

$$h(x, y, z, t) = c \quad (3.5)$$

dove c è una costante. La condizione di carico idraulico costante nel tempo in una ben determinata posizione nello spazio può essere generata dalla presenza di corpi idraulici superficiali di dimensioni considerevoli (ad esempio nel presente elaborato dovuta alla presenza del fiume Hudson). Essa può essere implementata tramite il pacchetto CHD (Time-Variant Specified-Head package), attraverso il quale è possibile assegnare dei carichi idraulici in determinati istanti temporali ed in una posizione spaziale definita.

- Condizione di Neumann o condizione del secondo tipo, in cui viene specificata la derivata del carico idraulico al confine del sistema acquifero. Il flusso viene calcolato attraverso la legge di Darcy [19], ad esempio una condizione di flusso imposta sulla faccia $\Delta x \Delta z$ potrebbe essere scritta come:

$$\frac{\partial h}{\partial y} = -\frac{q_y}{K_y} \quad (3.6)$$

in cui q_y rappresenta la portata specifica per unità di sezione [L/T] mentre K_y indica la conducibilità idraulica ortogonale alla sezione. La condizione di flusso nullo è una particolare condizione del secondo tipo, nel presente elaborato assegnata lungo il confine occidentale dell'area di studio, assunto impermeabile. Questa condizione viene utilizzata per rappresentare zone di ricarica, ad esempio un tasso di infiltrazione, o una condizione di immissione/estrazione dovuta alla presenza di un pozzo attivo. Esse sono implementabili in Modflow attraverso i pacchetti RCH, Recharge package, e WEL, well package.

- Condizione di Cauchy o del terzo tipo, in cui il flusso attraverso il contorno viene stimato attraverso la legge di Darcy utilizzando un gradiente idraulico dato dalla differenza tra il carico idraulico all'esterno del contorno e il carico calcolato dal modello sul contorno o in

prossimità. Essa è definita condizione mista, poichè lega il carico idraulico al contorno (h_b) con una condizione di flusso al contorno [19]. Il flusso si può esprimere come:

$$Q = \vartheta(h_b - h) \quad (3.7)$$

in cui h rappresenta il carico idraulico all'esterno, ϑ viene definito conduttanza [L^2/T]. La conduttanza è pari al rapporto tra il prodotto della permeabilità e dell'area perpendicolare lungo la direzione di flusso, e lo spessore dell'interfaccia [20]. Essa risulta pari a:

$$\vartheta = \frac{KA}{L} \quad (3.8)$$

In figura 3-2, viene riportata una rappresentazione del concetto di conduttanza.

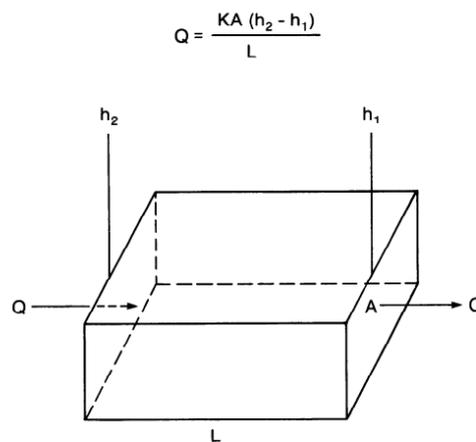


Figura 3-2: concetto di conduttanza (McDonald, Harbaugh 1988)

Modflow per ottenere una risoluzione dell'equazione (3.4) ricorre al metodo delle differenze finite. Applicando questo metodo, la derivata prima del carico idraulico lungo l'asse x può essere scritta come:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h_{i+1,j,k} - h_{i-1,j,k}}{2\Delta x} \quad (3.9)$$

con $2\Delta x$ distanza tra i nodi $h_{i+1,j,k}$ e $h_{i-1,j,k}$. La derivata seconda lungo l'asse x , nell'ipotesi di griglia regolare, viene così approssimata:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta x} - \frac{h_{i,j,k} - h_{i-1,j,k}}{\Delta x} \right] = \frac{h_{i+1,j,k} - 2h_{i,j,k} + h_{i-1,j,k}}{(\Delta x)^2} \quad (3.10)$$

Si possono scrivere espressioni simili lungo l'asse y , z e nel tempo. La derivata del carico idraulico rispetto al tempo può essere discretizzata come:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h_{i,j,k}^{n+1} - h_{i,j,k}^n}{\Delta t} \quad (3.11)$$

in cui gli apici applicati al carico idraulico distinguono i due intervalli temporali in cui viene applicata la discretizzazione.

3.1 Griglia di calcolo

La griglia di calcolo (figura 3-1) è composta da tre layer, il cui andamento altimetrico è stato ricostruito attraverso metodi di interpolazione; il primo layer include l'uso del suolo (edifici, strade e spazi verdi), il secondo layer contiene lo strato di copertura ed il terzo layer si estende dal bottom dello strato di copertura al top dello strato roccioso di fondo. La griglia è stata realizzata importando lo shapefile poligonale dell'area di Hoboken, realizzato in ArcGis, all'interno del software ModelMuse; ogni cella ha una dimensione quadrata di lato pari a 3 m, per un totale di 357.000 celle circa per layer. La topografia dei layer realizzata in ArcGis è stata importata previa conversione in file .grd attraverso l'utilizzo del software QGis; poiché l'utilizzo del formato ASCII, ottenibile da ArcGis, comportava la mancata sovrapposizione di 148 celle per layer.

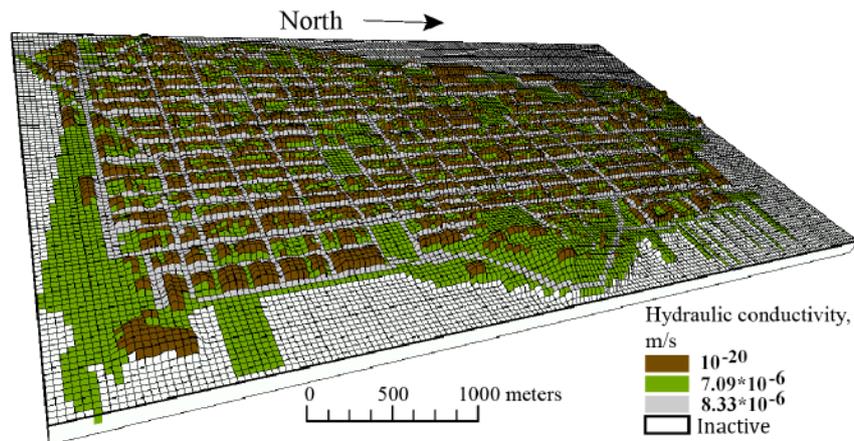


Figura 3-1: griglia di calcolo realizzata in ModelMuse per la modellazione numerica del flusso sotterraneo

3.1.1 Condizioni al contorno

L'idea di partenza consisteva nell'utilizzare le misurazioni di campo per assegnare le condizioni al contorno lungo il confine nord e sud dell'area di studio (vedasi Figura 2-1 (b)) in base ai valori del livello di falda ottenuti rispettivamente dai piezometri di osservazione GW13 e B19. A seguito della perdita del sensore installato nel piezometro GW-13 e del conseguente limitato periodo di osservazione, pari a 2 settimane, la condizione al contorno imposta dalla presenza del fiume è stata estesa al confine nord dell'area di studio. Questa è comunque una buona approssimazione delle condizioni al contorno, visto la posizione e la lunghezza di questo confine.

Sono stati individuati tre condizioni al contorno, figura 3-2:

- Inland boundary, lungo il confine occidentale dell'area di studio, in verde, cui è stato assegnato la condizione di assenza di flusso, condizione del secondo tipo o di Neumann;
- South boundary, confine meridionale, condizione di carico idraulico assegnato, ottenuta dalle misurazioni eseguite nel piezometro B19 dal 07/11/2018 al 23/01/2019;
- Shore boundary, in blu, ottenuta dal monitoraggio del livello idrico del fiume Hudson, eseguito dalla stazione meteorologica 8518750 The Battery, NYC .

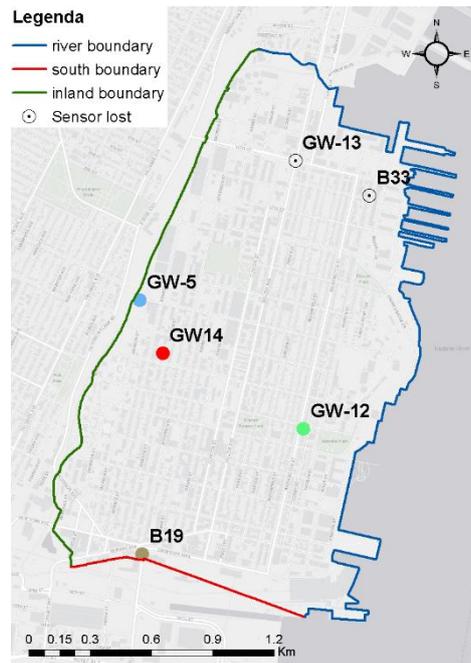


Figura 3-2: condizioni il contorno e sensori persi durante il periodo di osservazione

I dati ottenuti dalle osservazioni del livello di falda all'interno del piezometro B19 sono stati fittati ricorrendo all'utilizzo della serie di Fourier implementata in Matlab, eq. 3.12, in modo da ottenere un andamento del livello di falda estendibile al di fuori del periodo di osservazione. Si è scelto di utilizzare la serie di Fourier poiché il livello di falda segue un andamento periodico riconducibile ad una combinazione lineare di funzioni trigonometriche:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) \quad (3.12)$$

In tabella 3-1 si riportano i valori dei coefficienti della serie di Fourier utilizzata per il fitting.

Tabella 3-1: parametri serie di Fourier

a_0	a_1	b_1	a_2	b_2	ω
-0.4212	-0.0202	0.01408	-7.06E-05	-0.02638	0.158

In figura 3-3, si riporta il fitting dei dati misurati e l'estensione dell'andamento individuato sino all'inizio del periodo di simulazione considerato.

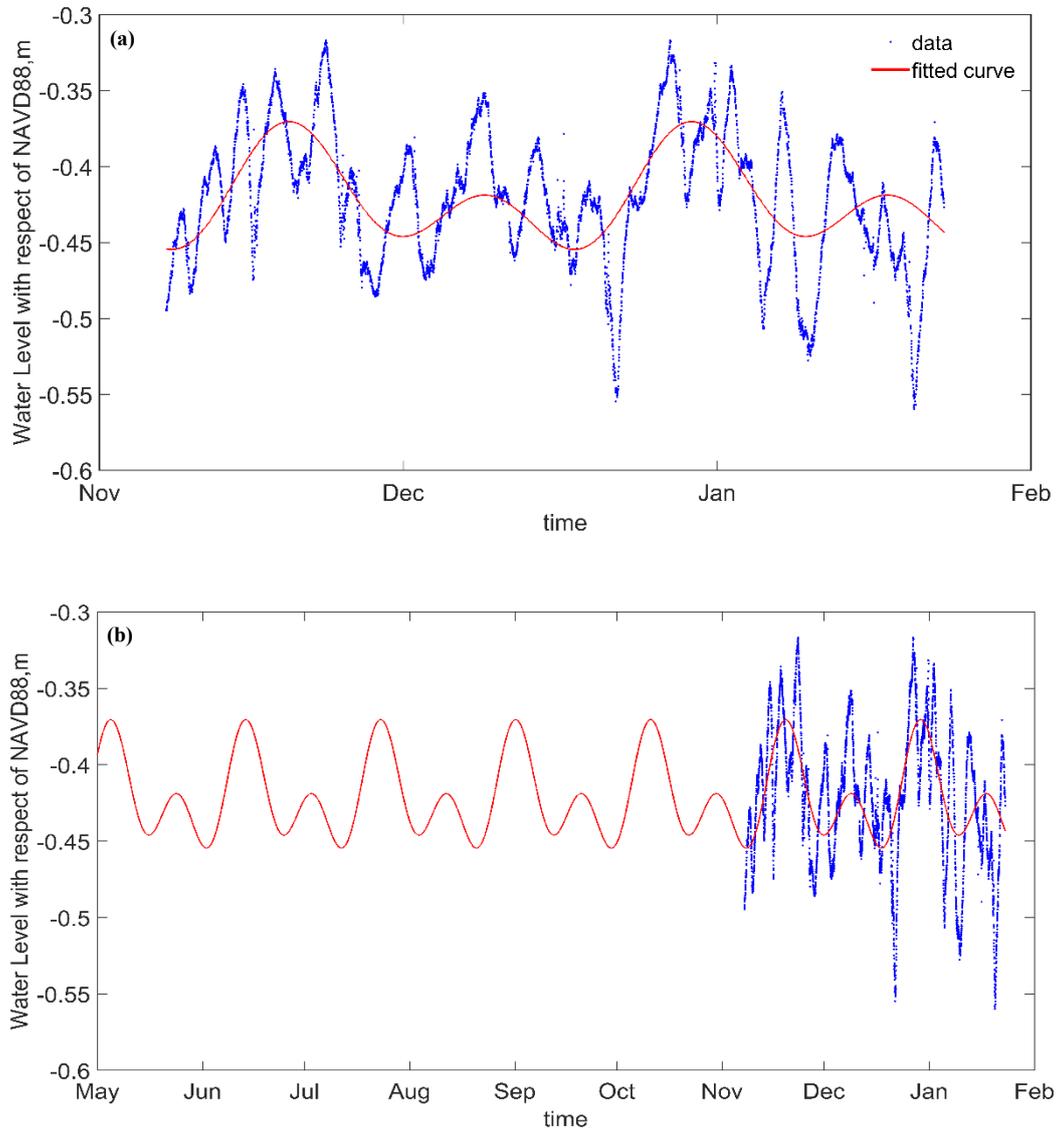


Figura 3-3: (a) regressione dei dati osservati tramite l'utilizzo della serie di Fourier, (b) estensione della funzione fino all'inizio del periodo di simulazione

3.2 Stima della conducibilità idraulica

Per assegnare un valore di conducibilità idraulica al sottosuolo si è fatto riferimento ad un precedente studio che tratta la modellazione del flusso sotterraneo e dell'interazione tra esso e il sistema fognario all'interno dell'area di studio [13] e ai risultati dei test di permeabilità eseguiti dalla compagnia AECOM, localizzati nell'area sud-ovest e nord-est di Hoboken, contenuti

all'interno dell'elaborato "Rebuild by design Hudson River project", figura 3-4. Nel precedente studio è stata applicata l'equazione di diffusività monodimensionale:

$$D = \frac{Kb}{S_y} = \frac{x^2\pi}{(\ln A)^2\tau} \quad (3.13)$$

in cui D [L^2/T] rappresenta la diffusività monodimensionale, x rappresenta la distanza tra il piezometro considerato e la linea di costa, S_y è il rendimento specifico o porosità efficace [-], b è lo spessore dell'acquifero, A 'tidal efficiency' rappresenta il rapporto tra la variazione di ampiezza osservata in un piezometro e l'ampiezza di oscillazione della marea. Questa stima risulta applicabile per gli acquiferi costali non confinati in cui l'ampiezza della marea risulta contenuta rispetto lo spessore dell'acquifero [4]. Il rendimento specifico è stato assunto pari a 0,23, ricadente nel range che caratterizza sabbia grossa, sabbia fine, sabbia e ghiaia [21]. Dall'applicazione di quest'equazione si è stimato un range di conducibilità idraulica pari a $0,63 \pm 0,60$ [L/T], riconducibile all'eterogeneità del terreno indagato, alla presenza di strutture di fondazione e di sistemi sotterranei. Questo valore di conducibilità ricade nel range di terreni costituiti da sabbia e ghiaia.

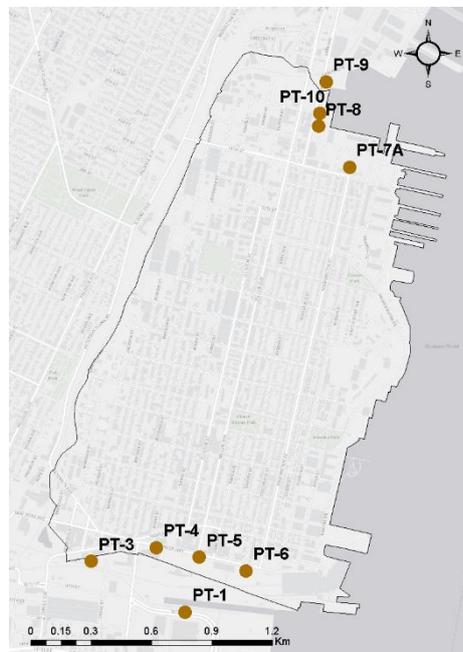


Figura 3-4: localizzazione test di permeabilità in situ

I test di permeabilità, prove Lefranc a carico variabile, sono stati eseguiti in sito ad una profondità rispettivamente di 3 e 6 piedi, pari all'incirca ad 1 e 2 m, seguendo le linee guida fornite dal NYCDEP Bureau of Engineering Design and Construction- Green Infrastructure. Viene realizzata una perforazione fino alla profondità di prova, contemporaneamente viene installato un tubo di rivestimento di diametro interno pari a 4 pollici; al di sotto del rivestimento, viene posizionato uno strato di sabbia grossolana, diametro compreso tra 4.75 e 2 mm, di spessore pari a 6-8 pollici. La formazione interessata dalla perforazione viene saturata e vengono registrati ad intervalli di tempo stabiliti gli abbassamenti del livello idrico. La permeabilità idraulica media è stata stimata utilizzando le seguenti formule, in linea con la ASTM(American Society for Testing and Materials International) D6391:

$$K_m = \pi \cdot R_t \cdot \frac{d \cdot \left(\ln \frac{h_1}{h_2}\right)}{11 \cdot (t_2 - t_1)} \quad (3.14)$$

$$R_t = \frac{2.2902(0.9842^T)}{T^{0.1702}} \quad (3.15)$$

dove:

- K_m , permeabilità idraulica media (in/hr), $K_m = \sqrt{k_h \cdot k_v}$;
- k_h , permeabilità orizzontale (in/hr);
- k_v , permeabilità verticale (in/hr);
- D , diametro interno del tubo di rivestimento (in);
- h , livello idrico al di sopra del bottom dell'involucro (in);
- t , tempo (hr);
- R_t , rapporto tra la viscosità dell'acqua alla temperatura di prova e la viscosità dell'acqua a 20°C;
- T , temperatura (°C).

Si è scelto di utilizzare un valore medio della conducibilità ottenuta dai test di permeabilità, tabella 3-2, poiché dal confronto con i sondaggi geognostici il loro range è stato considerato maggiormente rappresentativo della composizione del suolo all'interno dell'area di studio, caratterizzato da frazioni di limo ed argilla. Le coordinate in tabella 3-2 sono espresse nel sistema di riferimento New Jersey State plane NAD 83.

Tabella 3-2: localizzazione e valori di conducibilità idraulica dei test di permeabilità eseguiti da AECOM

Date	Permeability coefficient at 3ft Km(m/s)	Permeability coefficient at 6ft Km(m/s)	Ground Elevation (m) with respect to NAVD88	Northing	Easting
18/06/2018	$3.62 \cdot 10^{-5}$	$1.23E \cdot 10^{-5}$	2.35	692507.53	620730.46
12/09/2018	$1.13 \cdot 10^{-5}$	$3.95 \cdot 10^{-6}$	2.26	693348.54	619223.77
10/05/2018	$1.41 \cdot 10^{-7}$	$5.15 \cdot 10^{-6}$	1.38	693564.16	620286.96
16/05/2018	$7.06 \cdot 10^{-8}$	-	1.37	693400.79	620977.52
29/08/2018	-	$7.06 \cdot 10^{-8}$	3.36	693169.14	621745.78
10/04/2018	$9.53 \cdot 10^{-6}$	$2.12 \cdot 10^{-7}$	3.12	699831.37	623420.39
12/04/2018	$7.06 \cdot 10^{-8}$	$7.06 \cdot 10^{-8}$	2.53	700505.77	622907.95
15/05/2018	$2.12 \cdot 10^{-7}$	$2.14 \cdot 10^{-5}$	3.15	701239.30	623049.21
29/05/2018	$1.26 \cdot 10^{-5}$	$2.12 \cdot 10^{-7}$	2.40	700692.63	622917.94

Per assegnare una conducibilità idraulica all'asfalto, si è considerata una conducibilità verticale o tasso di infiltrazione pari a 0.5 mm/min, in riferimento ad asfalti drenanti che sono stati sottoposti ad usura per 4 anni senza essere soggetti ad interventi manutentivi [22]. Infine, per le aree verdi è stata considerata una conducibilità pari a quella del terreno; mentre agli edifici è stato assegnato un valore trascurabile di conducibilità idraulica. Non è stato possibile considerare gli edifici impermeabili, poiché un contrasto eccessivo di conducibilità comporta la mancata convergenza del modello.

Nell'implementazione del modello la conducibilità trasversale è stata considerata pari alla conducibilità longitudinale, mentre la conducibilità verticale è stata considerata pari al 10% di quella longitudinale. In tabella 3-4, si riportano i valori di conducibilità longitudinale adoperati ad eccezione dell'asfalto per cui si riporta il tasso d'infiltrazione.

Tabella 3-4: valori di conducibilità idraulica scelti per lo strato superiore

<i>K</i> (m/s)		
Suolo	Asfalto	Edifici
$7.1 \cdot 10^{-6}$	$8.3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-20}$

3.3 Condizioni di ricarica

All'interno del presente elaborato sono state considerate due tipologie di termini di ricarica, il primo dovuto all'infiltrazione nel terreno di volumi d'acqua a seguito di eventi piovosi ed il secondo dovuto alla mancata infiltrazione di acqua di falda all'interno di una parte significativa della rete fognaria, la quale svolge il ruolo di fattore limitante nell'innalzamento del livello di falda. Sono stati considerati gli eventi piovosi di durata pari a 24 ore con periodo di ritorno rispettivamente di 1 e 10 anni, tabella 3-5. I valori sono stati ottenuti dal Precipitation Frequency Data Server (PDFS) del NOAA's National Weather Service [23] , che riporta le altezze pluviometriche in funzione di durata e periodo di ritorno, figura 3-5.

Per stimare l'infiltrazione all'interno dell'area di studio è stato utilizzato un modello realizzato attraverso l'uso del software SWMM, Storm Water Management Model, sviluppato dall'EPA per la simulazione del deflusso in idrico in zone urbane. Attraverso questo modello, sviluppato in un precedente elaborato per indagare l'interazione tra acque sotterranee e rete fognaria, nota l'intensità dell'evento piovoso, da cui è stata realizzata la curva di distribuzione cumulata nel rispetto dello standard NRCS (Natural Resources Conservations Service) Type III raccomandato

da USDA(U.S. Department of Agriculture) [24], ed ipotizzando condizioni di assenza di precipitazioni (‘dry weather conditions’) per un lasso temporale antecedente la precipitazione pari a 3 giorni sono stati ricavati i tassi di infiltrazione giornalieri su tutta l’area, tabella 3-6. Le infiltrazioni all’interno del sistema fognario nell’area di studio sono state misurate dall’ente NHSA, Noth Hudson Sewerage Authority, nel 2016; il quale ha determinato il tasso di infiltrazione medio giornaliero, tabella 3-7, per otto sottobacini, figura 3-6, all’interno dell’area di studio (H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7 e HSI) [25].

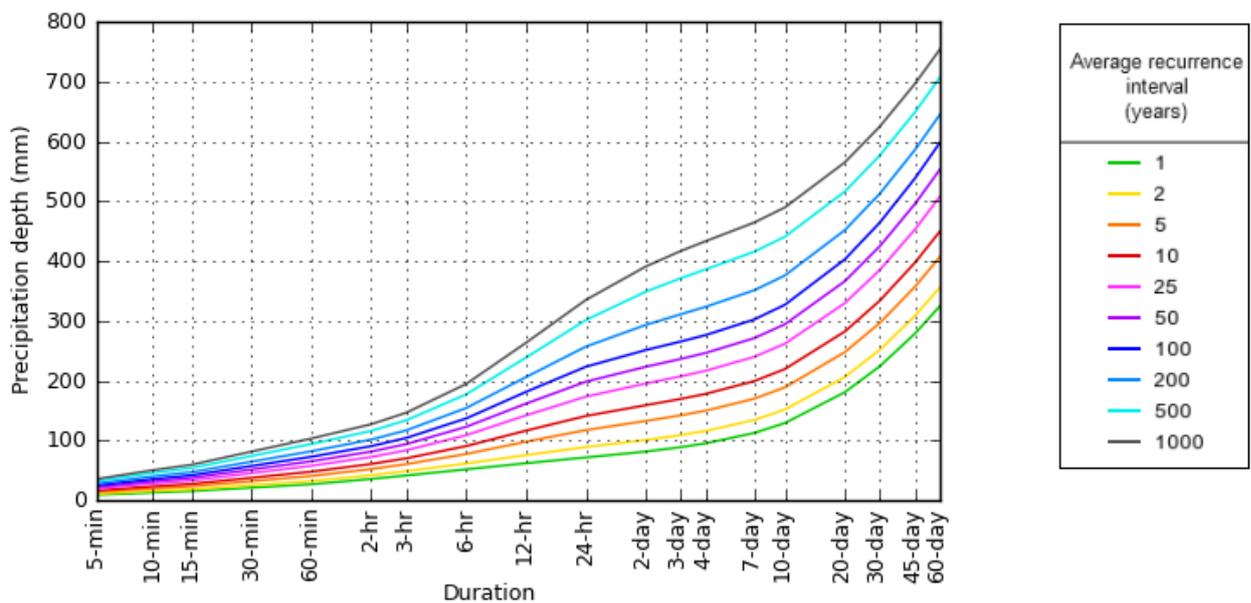


Figura 3-5: altezza pluviometrica in funzione della durata della precipitazione e del periodo di ritorno (NOAA, Precipitation Frequency Data Server)

Tabella 3-5: altezza pluviometrica

Altezza pluviometrica (m/day)	
1-year	10-year
0.0721	0.1415

Tabella 3-6: tasso di infiltrazione

Tasso di infiltrazione (m/day)	
1-year	10-year
0.0071	0.0087

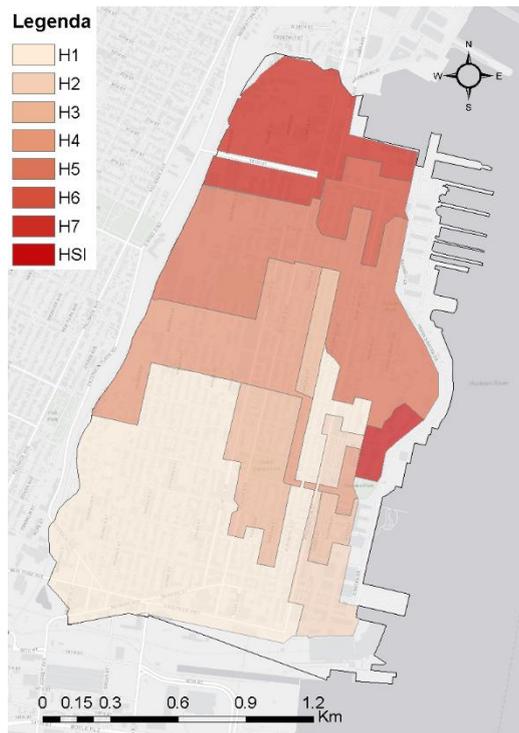


Figura 3-6: sottobacini in cui è stato stimato il tasso di infiltrazione all'interno del sistema fognario

Tabella 3-7: tasso di infiltrazione giornaliero all'interno del sistema fognario

Basin	Ir (m3/day)
H1	4126
H3	3161
H7	3157
H5	1707
H4	1544
H2	1041
HSI	553
H6	401

4 Risultati e discussione

4.1 Anali dati misurazioni in campo

Di seguito si riportano i dati ottenuti dalla campagna di misurazioni di campo, in cui è stato registrato in continuo l'andamento della temperatura e del livello di falda, i quali sono stati rapportati all'andamento della marea e delle precipitazioni, ottenuti rispettivamente dalle stazioni meteorologiche 8518750 The Battery, che si colloca all'interno di Battery Park (NYC), e Pier 84, che si colloca all'interno dell'Hudson River Park (NYC).

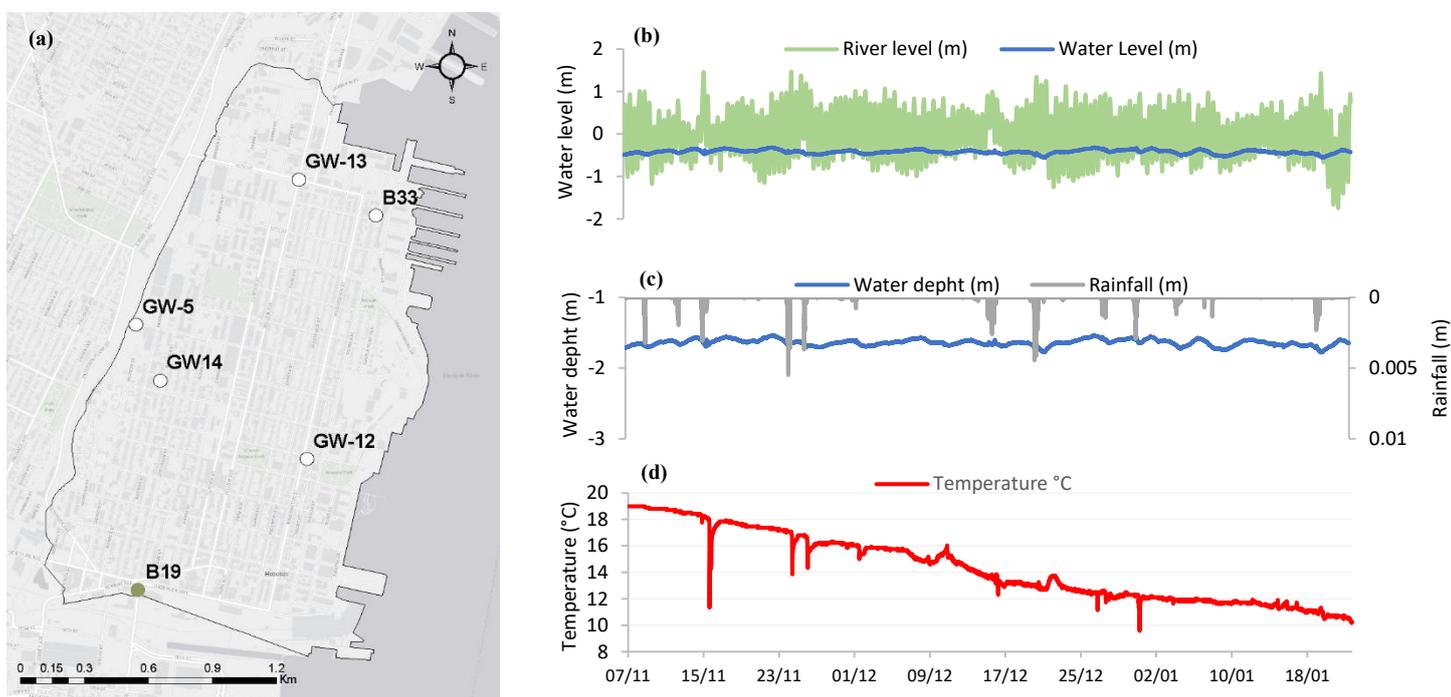


Figura 4-1: (a) localizzazione piezometro B19, (b) confronto tra livello idrico misurato in situ e andamento del livello idrico del fiume Hudson, entrambi riferiti al datum NAVD88, (c) confronto tra la profondità della tavola d'acqua, in riferimento al suolo, misurata in situ ed intensità evento piovoso, (d) temperatura misurata in situ

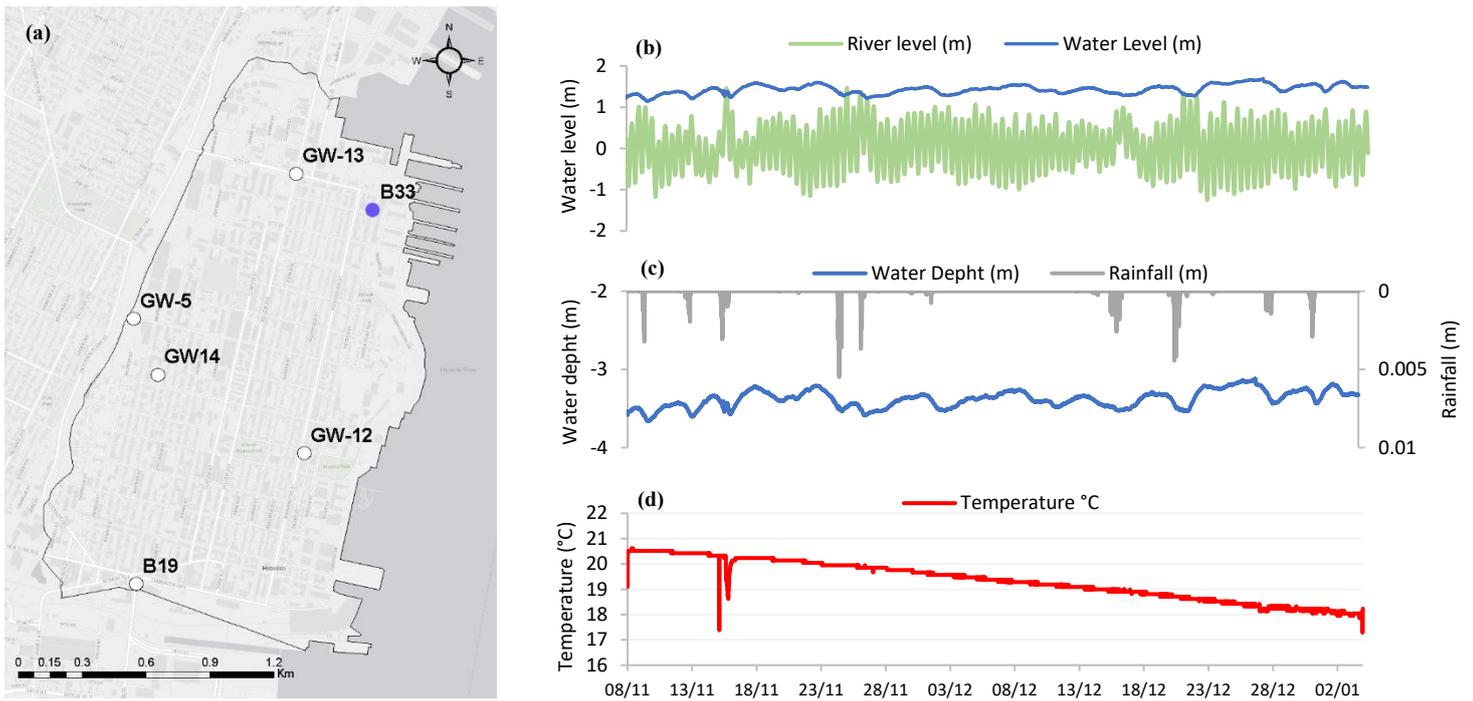


Figura 4-2: (a) localizzazione piezometro B33, (b) confronto tra livello idrico misurato in situ e andamento del livello idrico del fiume Hudson, entrambi riferiti al datum NAVD88, (c) confronto tra la profondità della tavola d'acqua, in riferimento al suolo, misurata in situ ed intensità evento piovoso, (d) temperatura misurata in situ

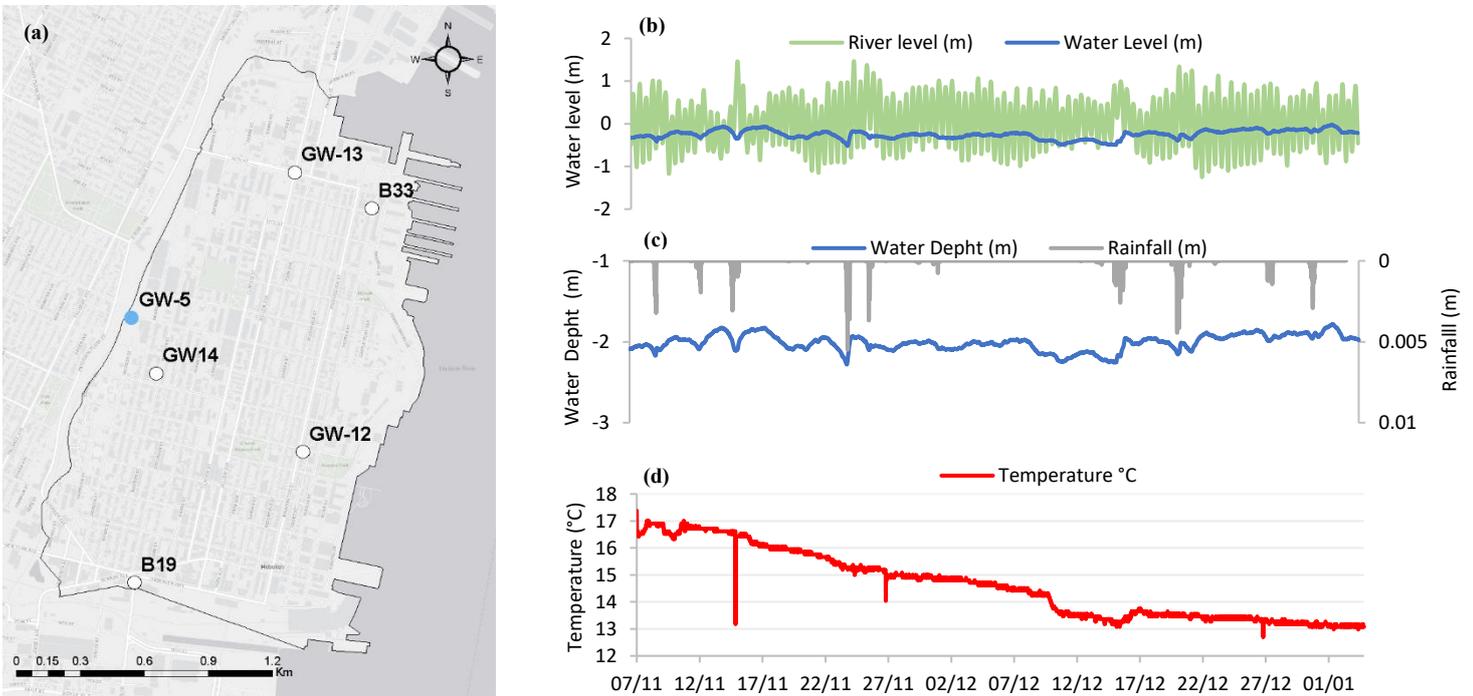


Figura 4-3: (a) localizzazione piezometro GW5, (b) confronto tra livello idrico misurato in situ e andamento del livello idrico del fiume Hudson, entrambi riferiti al datum NAVD88, (c) confronto tra la profondità della tavola d'acqua, in riferimento al suolo, misurata in situ ed intensità evento piovoso, (d) temperatura misurata in situ

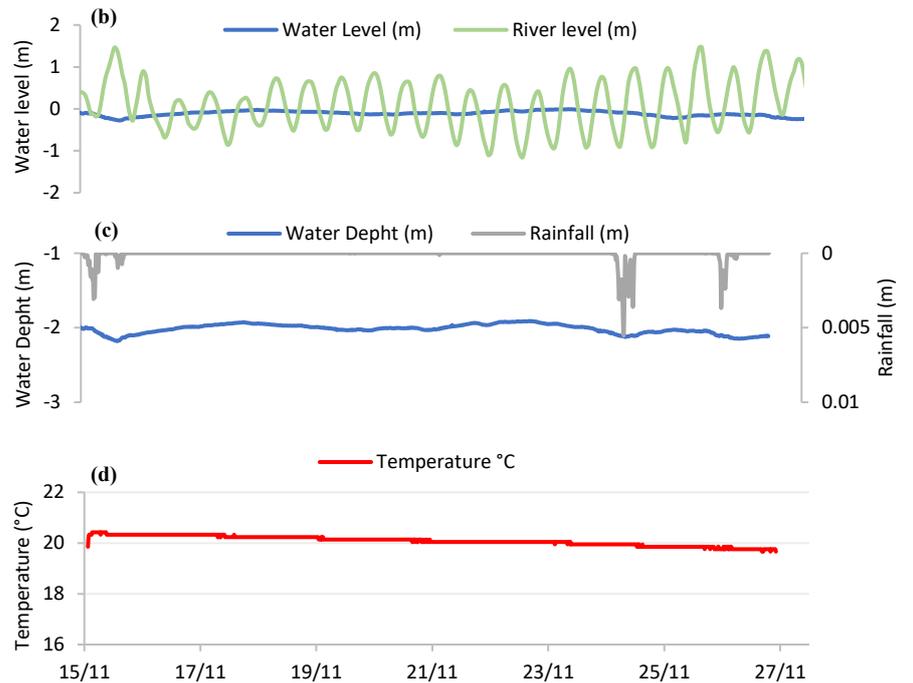


Figura 4-4: (a) localizzazione piezometro GW13, (b) confronto tra livello idrico misurato in situ e andamento del livello idrico del fiume Hudson, entrambi riferiti al datum NAVD88, (c) confronto tra la profondità della tavola d'acqua, in riferimento al suolo, misurata in situ ed intensità evento piovoso, (d) temperatura misurata in situ

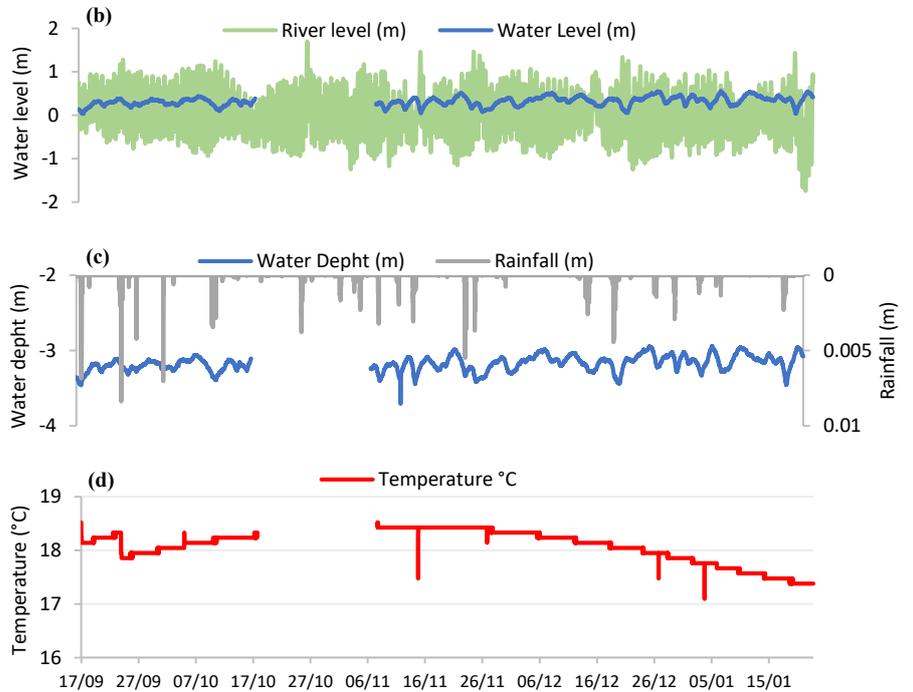


Figura 4-5: (a) localizzazione piezometro GW12, (b) confronto tra livello idrico misurato in situ e andamento del livello idrico del fiume Hudson, entrambi riferiti al datum NAVD88, (c) confronto tra la profondità della tavola d'acqua, in riferimento al suolo, misurata in situ ed intensità evento piovoso, (d) temperatura misurata in situ

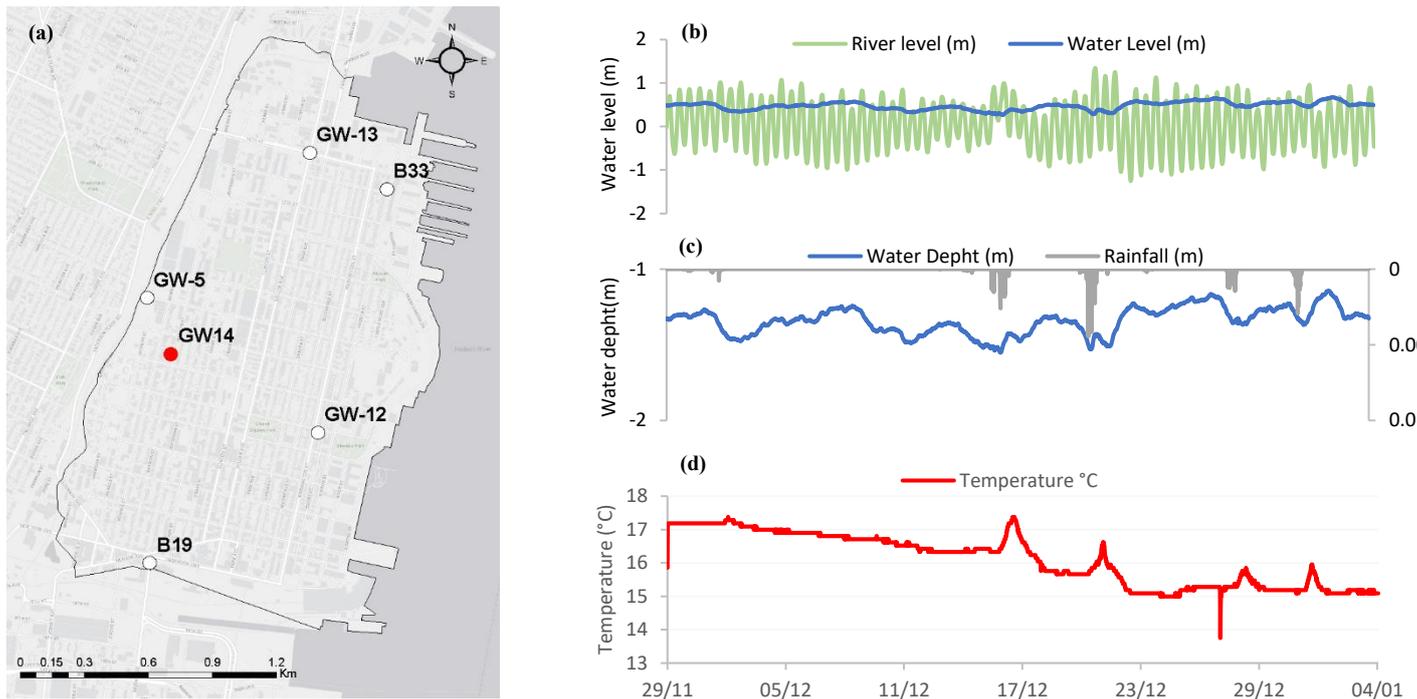


Figura 4-6: (a) localizzazione piezometro GW14, (b) confronto tra livello idrico misurato in situ e andamento del livello idrico del fiume Hudson, entrambi riferiti al datum NAVD88, (c) confronto tra la profondità della tavola d'acqua, in riferimento al suolo, misurata in situ ed intensità evento piovoso, (d) temperatura misurata in situ

Dall'analisi delle figure precedenti si può dedurre che il livello di falda non è direttamente influenzato dagli eventi piovosi, ciò è comune nelle aree urbane in cui la forte urbanizzazione limita l'infiltrazione dell'acqua piovana all'interno del sottosuolo. La temperatura segue un trend decrescente; nel piezometro B19, figura 4-1(d), è stata registrata una maggior variazione di temperatura imputabile a fattori locali, quale ad esempio una differente conducibilità termica del sottosuolo. In figura 4-5, si può notare una mancanza di dati in una finestra temporale pari all'incirca a 2 settimane, dovuta probabilmente ad un'estrazione del sensore da parte della municipalità di Hoboken durante l'esecuzione di misurazioni. In figura 4-4 (b) si può notare che il livello di falda misurato all'interno del piezometro GW-13 si attesta attorno al livello medio della marea, considerato ciò, la scelta di estendere la condizione al contorno imposta dalla presenza del fiume Hudson al confine superiore può considerarsi un'approssimazione plausibile.

Dalla figura 4-7 si deduce che il livello idrico di falda diminuisce all'aumentare della distanza dalla linea di costa, il livello idrico maggiore è stato riscontrato nei piezometri di monitoraggio B33 e GW-12. Il livello idrico segue un trend nord-sud (maggiore a nord e minore a sud).

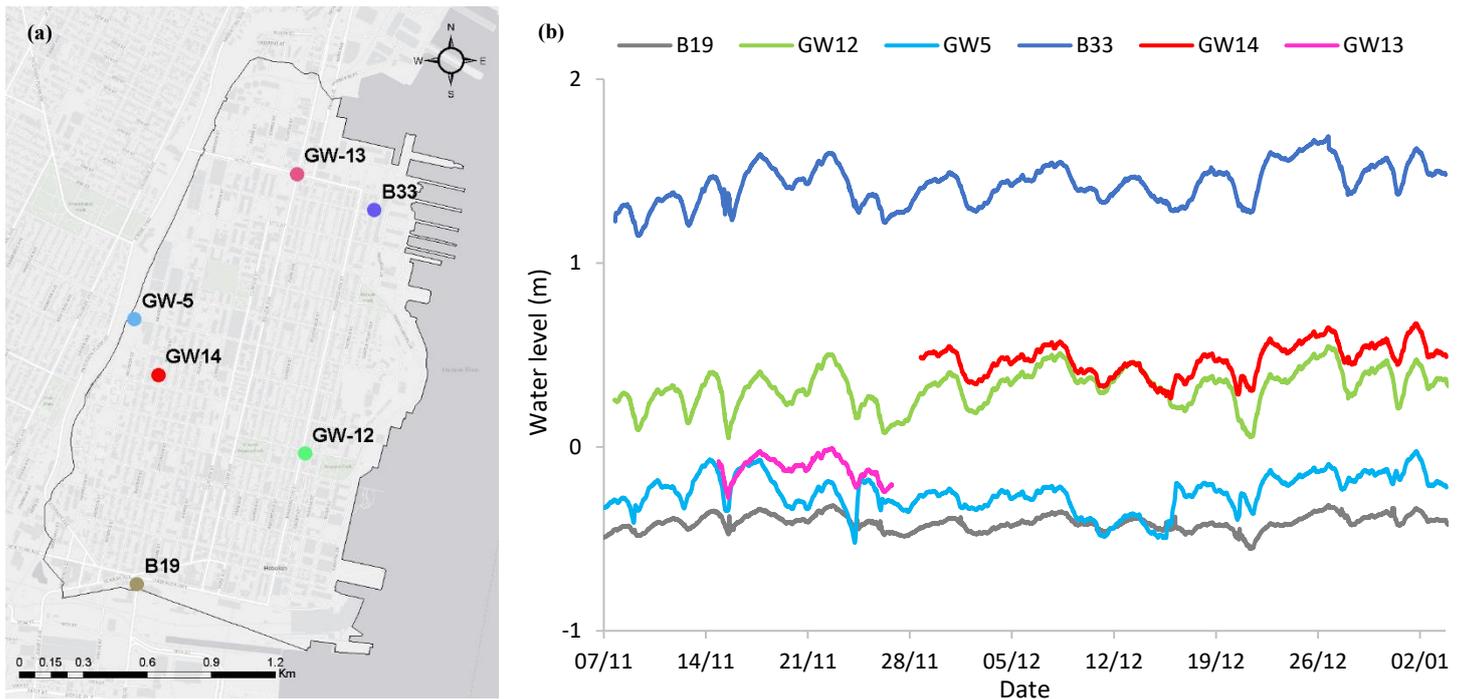


Figura 4-7: (a) localizzazione piezometri di monitoraggio, (b) confronto tra water level in riferimento al datum NAVD88

In figura 4-8 si riporta una piezometria dell'area di studio ottenuta in ArcGis applicando la tecnica di interpolazione spaziale IDW, Inverse Distance Weighted, la quale sarà trattata in seguito nel *paragrafo 4.2*, ed il tool Contour. L'IDW è stata applicata ai valori mediati, nei rispettivi intervalli di monitoraggio, del livello di falda misurato all'interno dei 6 piezometri di osservazione, tabella 4-1, per ottenere la superficie piezometrica da cui sono state ricavate le isopieze tramite il tool Contour. La carta piezometrica, figura 4-8, indica che il livello di falda è maggiore nell'area nord-est ed in generale tende a diminuire all'aumentare della distanza dalla linea di costa. Il livello piezometrico all'interno dell'area di studio varia all'incirca tra 1.4 e -0.4 m.

Tabella 4-1: livelli medi di falda misurati all'interno dei piezometri di osservazione

Average Water Level with respect to NAVD88 (m)					
B19	GW14	GW12	GW13	GW5	B33
-0.42	0.47	0.32	-0.11	-0.25	1.43

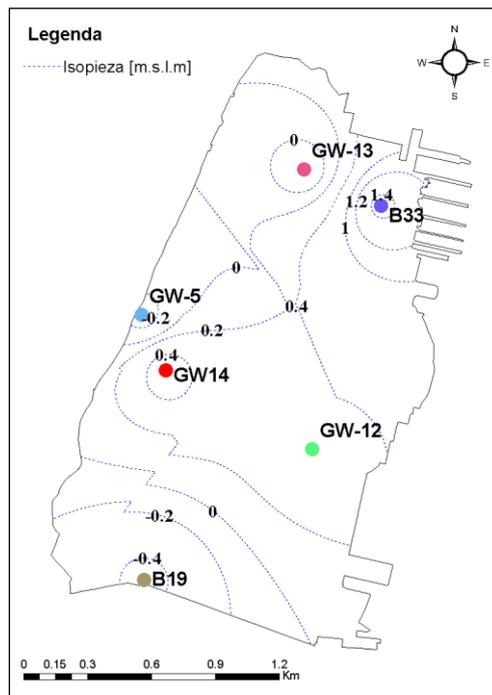


Figura 4-8: carta piezometrica dell'area di studio, isopieze (m.s.l.m)

4.2 Ricostruzione stratigrafica

Per la ricostruzione della stratigrafia è stato utilizzato un software GIS, Geographic Information System, esso è un sistema informatico che permette la visualizzazione, gestione ed analisi di dati spazialmente riferiti alla superficie terrestre; viene utilizzato in svariati campi, quali ad esempio l'urbanistica, l'individuazione di aree di salvaguardia, realizzazioni di bilanci idrologici. L'utilizzo di questo software è finalizzato alla realizzazione di carte tematiche da cui è possibile trarre informazioni utilizzabili per la gestione del territorio, far fronte a criticità di carattere sociale, economico, antropico; esso permette di combinare la rappresentazione geografica e di altre informazioni [26].

In questo elaborato si è ricorso l'utilizzo di ArcGis 10.4.1 per la ricostruzione dell'altimetria dello strato di copertura e dello strato di fondo tramite l'interpretazione dei sondaggi stratigrafici, introdotti nel *paragrafo 2.3*, e per la realizzazione di carte tematiche. Per una descrizione degli step seguiti per l'interpretazione dei sondaggi stratigrafici si rimanda all'*Appendice B*. Dopo aver

analizzato i sondaggi geognostici ottenuti da diverse compagnie ingegneristiche e da enti locali, essi sono stati suddivisi in due categorie, figura 4-9:

- sondaggi che individuano la profondità dello strato di copertura superficiale;
- sondaggi che individuano la profondità dello strato roccioso di fondo.



Figura 4-9: (a) sondaggi che individuano la profondità del bottom dello strato di copertura, (b) sondaggi che individuano la profondità del top del basamento roccioso

Per la ricostruzione stratigrafica sono state utilizzate tecniche di interpolazione spaziale, esse permettono di stimare il valore di un parametro in punti in cui esso non è noto elaborando i dati campionati. Le tecniche di interpolazione spaziale possono essere divise in due macro-categorie, deterministiche e geostatistiche, le prime si basano su un criterio di similarità mentre le seconde utilizzano proprietà statistiche dei punti campionati, come l'autocorrelazione spaziale. L'autocorrelazione spaziale è uno dei concetti cardine su cui si fonda la geostatistica, essa deriva dalla "prima legge della geografia" introdotta da Tobler nel 1970: "everything is related to everything else, but near things are more related than distant things" (tutto è correlato, ma oggetti più vicini sono più correlati di oggetti lontani). Le tecniche di interpolazione geostatistiche vengono applicate nelle situazioni in cui la distribuzione di una variabile continua è nota in ben definite posizioni spaziali; vengono applicate quando si presume che la variabile sia influenzata dalla sua posizione e dalla distanza con i valori vicini [27].

Per l'interpolazione delle profondità del basamento roccioso e dello strato di riempimento sono stati utilizzati i tool IDW, Inverse Distance Weighted, ed EBK, Empirical Bayesian Kriging, i quali ricevono in input uno shapefile puntuale ed in base ai valori di un campo dello shapefile (profondità dello strato) forniscono in output un raster contenente i risultati dell'interpolazione. L'IDW assume che l'influenza dei punti campionati, nell'assegnazione del valore delle celle componenti il raster, diminuisca all'aumentare della distanza, esso adopera la seguente formula:

$$z(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^{-p} \cdot z(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n d_i^{-p}} \quad (4.1)$$

dove $z(x,y)$ è il valore stimato, n è pari al numero di punti considerati per l'interpolazione, $z(x_i, y_i)$ è il valore del parametro noto alle coordinate x_i, y_i , p è la potenza con cui diminuisce l'influenza dei punti all'aumentare della distanza (ad un aumento di p l'influenza dei punti a maggior distanza tende a diminuire). Per la scelta dei punti da considerare nell'interpolazione si può assegnare un raggio di ricerca di dimensioni fissate od assegnare un raggio di ricerca variabile che includa un numero precisato di punti. Nel presenta elaborato, data la scarsa e disuniforme distribuzione dei punti si è scelto di utilizzare un raggio di ricerca variabile che includesse 8 punti ed un valore di p pari a 2. In figura 4-10, vengono riportati i risultati dell'interpolazione, in cui è stata ritagliata l'area di Castel Point, vicino la linea di costa, poiché vi è la risalita superficiale dello strato roccioso di fondo.

Per ridurre i punti e le discontinuità ed ottenere una migliore interpolazione dei dati analizzati si è ricorso al metodo geostatico EBK, che si basa come tutte le tecniche di interpolazione geostatistiche sulla Teoria delle Variabili Regionalizzate di Matheron (1965), la quale quantifica la correlazione tra queste variabili fortemente dipendenti dalla posizione spaziale [27]. L'EBK ricade nelle tecniche di interpolazione denominate Kriging, tecniche statistiche per la predizione della distribuzione di dati spaziali; esse ricorrono all'utilizzo del semivariogramma, il quale quantifica il grado di variabilità dei punti a distanza crescente. Il semivariogramma riporta sulle ascisse la distanza tra i dati in input, lag, e sulle ordinate la semivarianza, stimata tra ogni coppia

di punti; esso viene utilizzato per la stima dei pesi da utilizzare per il calcolo dei valori incogniti (figura 4-11).

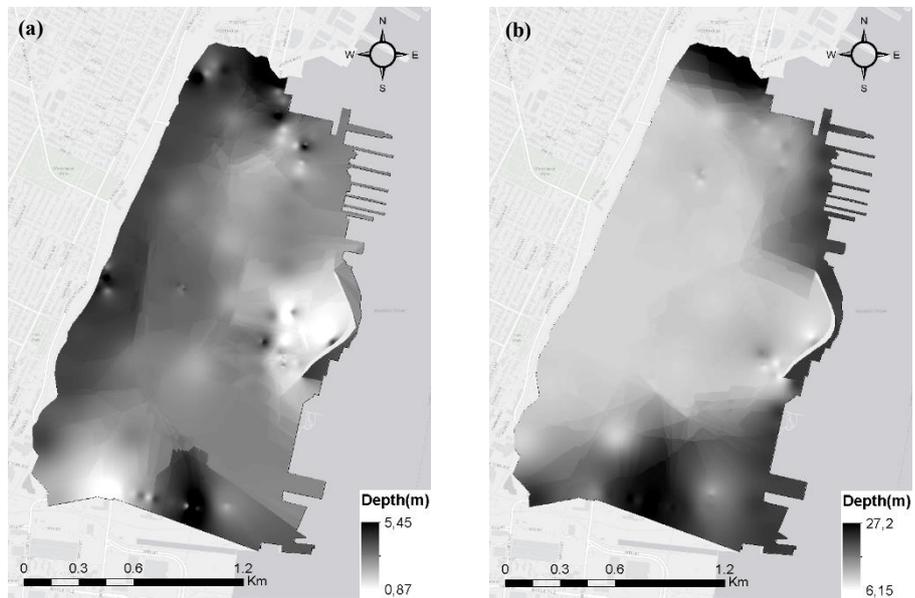


Figura 4-10: risultati interpolazione IDW, (a) profondità dello strato di copertura, (b) profondità dello strato di fondo

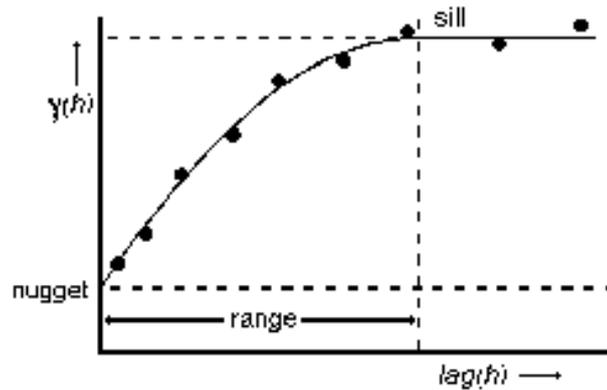


Figura 4-11: esempio di semivariogramma (De Zorzi e Barbizzi)

Il semivariogramma, $\gamma(h)$, è una funzione matematica che rappresenta la semivarianza di coppie di punti in funzione della distanza:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \{z(x_i) - z(x_i + h)\}^2 \quad (4.2)$$

in cui $z(x_i)$ e $z(x_i+h)$ rappresentano i valori assunti dalla variabile nel punto x_i e $x_i + h$, n indica il numero di coppie di punti separati da una distanza pari od inferiore ad h . Il semivariogramma viene descritto da tre parametri:

- range, distanza oltre la quale non vi è correlazione spaziale;
- sill, valore limite del semivariogramma;
- nugget, discontinuità della semivarianza, “imputabile alla variabilità casuale (incertezza di misura e/o strumentale ecc.) e alla variabilità spaziale presente a distanze inferiori a quella di campionamento” [28].

In seguito, viene adattato un modello matematico al semivariogramma; i modelli maggiormente utilizzati sono l’esponenziale, lo sferico, il gaussiano ed il power model. In questo elaborato è stato adottato il power model, il quale rappresenta un buon compromesso tra accuratezza e velocità di esecuzione:

$$\gamma(h) = \text{Nugget} + b \cdot h^\alpha \quad (4.3)$$

in cui il *Nugget* e la pendenza, b , devono essere positivi, e α (potenza) deve essere compresa tra 0.25 e 1.75. Questi parametri vengono stimati in modo autonomo all’interno del tool Empirical Bayesian Kriging contenuto in ArcGis.

L’EBK differisce dalle classiche tecniche di Kriging poiché tiene conto dell’errore che si introduce nella stima del modello di semivariogramma, mentre nelle classiche tecniche di Kriging si assume che il semivariogramma è stato modellato perfettamente. Questo metodo di interpolazione ricorre all’uso di più modelli di semivariogramma. Esso segue i seguenti step:

- stima di un modello di semivariogramma a partire dai dati;
- utilizzando il semivariogramma stimato, viene stimato un nuovo valore nella posizione spaziale dei valori noti;
- viene stimato un nuovo semivariogramma a partire dai dati stimati.

Questa procedura viene iterata per un numero specificato di volte, 100. Ad ogni iterazione, il semivariogramma stimato nel primo step viene utilizzato per simulare un nuovo set di valori nella posizione dei valori forniti in input. A differenza delle classiche tecniche Kriging, il cui maggior limite consiste nell'assumere che un solo modello di semivariogramma possa rappresentare la distribuzione spaziale dei dati su tutta l'area, nell'EBK la stima del modello di semivariogramma viene effettuata localmente, questo permette di tener conto di effetti locali in aree differenti. I dati vengono suddivisi in cluster, il modello viene applicato localmente ed infine, i vari modelli vengono combinati per ottenere la distribuzione dei valori su tutta l'area [29]. L'EBK implementato in ArcGis nell'estensione Geostatistical Analyst è considerato un semplice e robusto metodo di interpolazione [30]. In figura 4-12, vengono riportati i risultati dell'interpolazione.

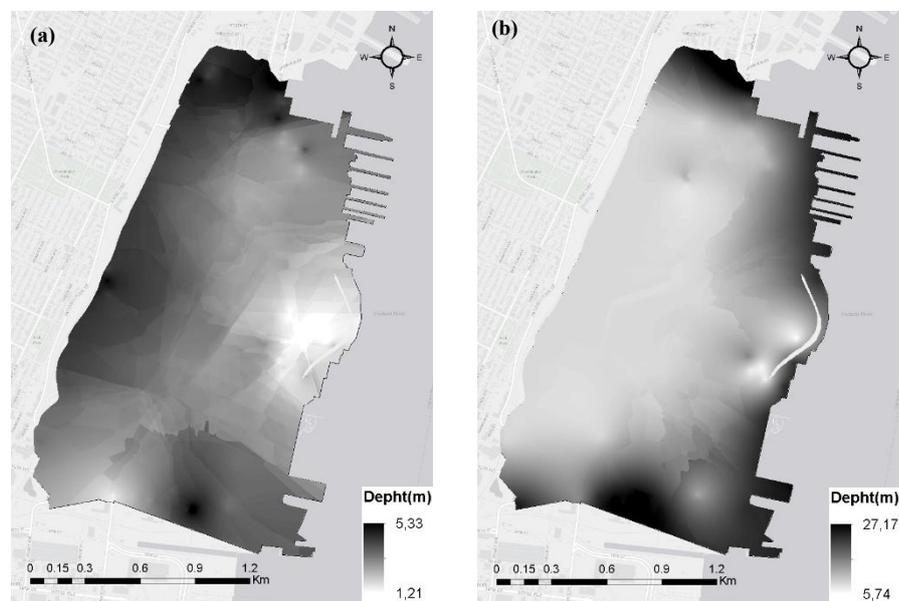


Figura 4-12: risultati interpolazione EBK, (a) profondità dello strato di copertura, (b) profondità dello strato di fondo

4.3 Analisi di sensitività

L'analisi di sensitività è finalizzata ad individuare l'influenza della variazione di un parametro in input sugli output generati dal modello; in questo elaborato è stata utilizzata per ottenere una stima del valore di conducibilità idraulica. Ogni modello che tratta la simulazione del flusso sotterraneo contiene delle incertezze, poiché essi sono semplificazioni della realtà. Per individuare un valore di conducibilità idraulica maggiormente rappresentativo dell'area di studio, il valore di partenza ottenuto dalla media dei risultati dei test di permeabilità è stato gradualmente variato al fine di ottenere una migliore sovrapposizione tra i valori di carico idraulico ottenuti dalla simulazione e i valori di carico idraulico misurati in sito. Per fare ciò sono stati inseriti all'interno del modello i piezometri di osservazione, come oggetti puntuali, ed è stato utilizzato il pacchetto HOB (Head Observation Package), il quale fornisce in output il valore simulato in un determinato punto ed istante temporale. È stato considerato uno *stress period* pari a 12 ore, sono state eseguite rispettivamente una simulazione allo stato stazionario, considerando le media delle condizioni al contorno, tabella 4-2, e 537 simulazioni allo stato transitorio, che ricoprono il periodo compreso tra il 01/05/2018 e il 23/01/2019. È stato applicato un valore di rendimento specifico o porosità efficace pari a 0.23, che ricade nel range delle sabbie da fini a grosse [15].

Tabella 4-2: condizioni al contorno media nell'intervallo 01/05/2018 – 23/01/2019

Average Water Level with respect to NAVD88 (m)	
B19	Hudson River
-0.42	0.085

Di seguito, si riporta un confronto grafico tra dati simulati e dati osservati, in ordinata, ed il tempo, in ascissa (intervallo pari a 12 ore) al variare dei valori di conducibilità idraulica, figura 4-13. Per valutare la capacità previsionale del modello è stata calcolata la deviazione standard, RMSE (root-mean-squared error), tra i valori osservati e i valori simulati per il singolo piezometro di osservazione e per l'intero set di dati, tabella 4-3.

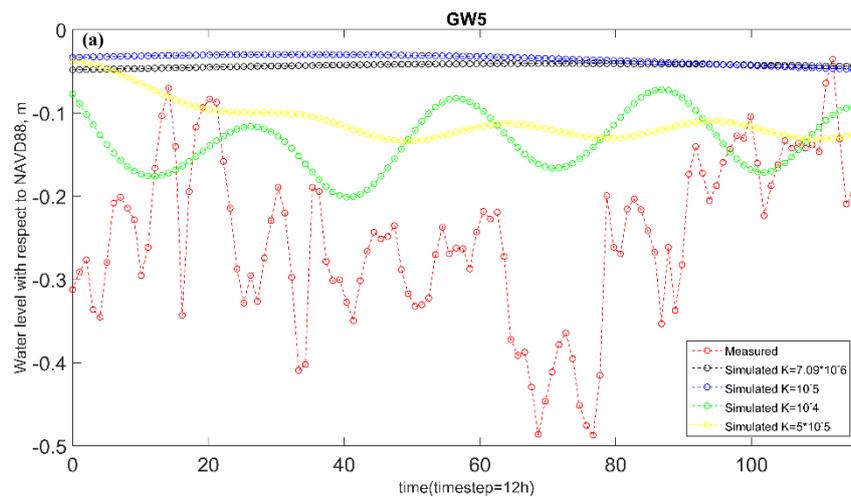
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (4.3)$$

con:

- S_i , valore simulato;
- O_i , valore osservato;
- n , numerosità del campione.

Tabella 4-3: valori di RMSE al variare della conducibilità idraulica

	RMSE			
	K(m/s)			
	$7.09 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
GW12	0.35	0.36	0.44	0.41
GW5	0.23	0.24	0.15	0.17
B33	1.43	1.44	1.50	1.48
GW14	0.57	0.56	0.64	0.63
Tot	0.749	0.754	0.799	0.785



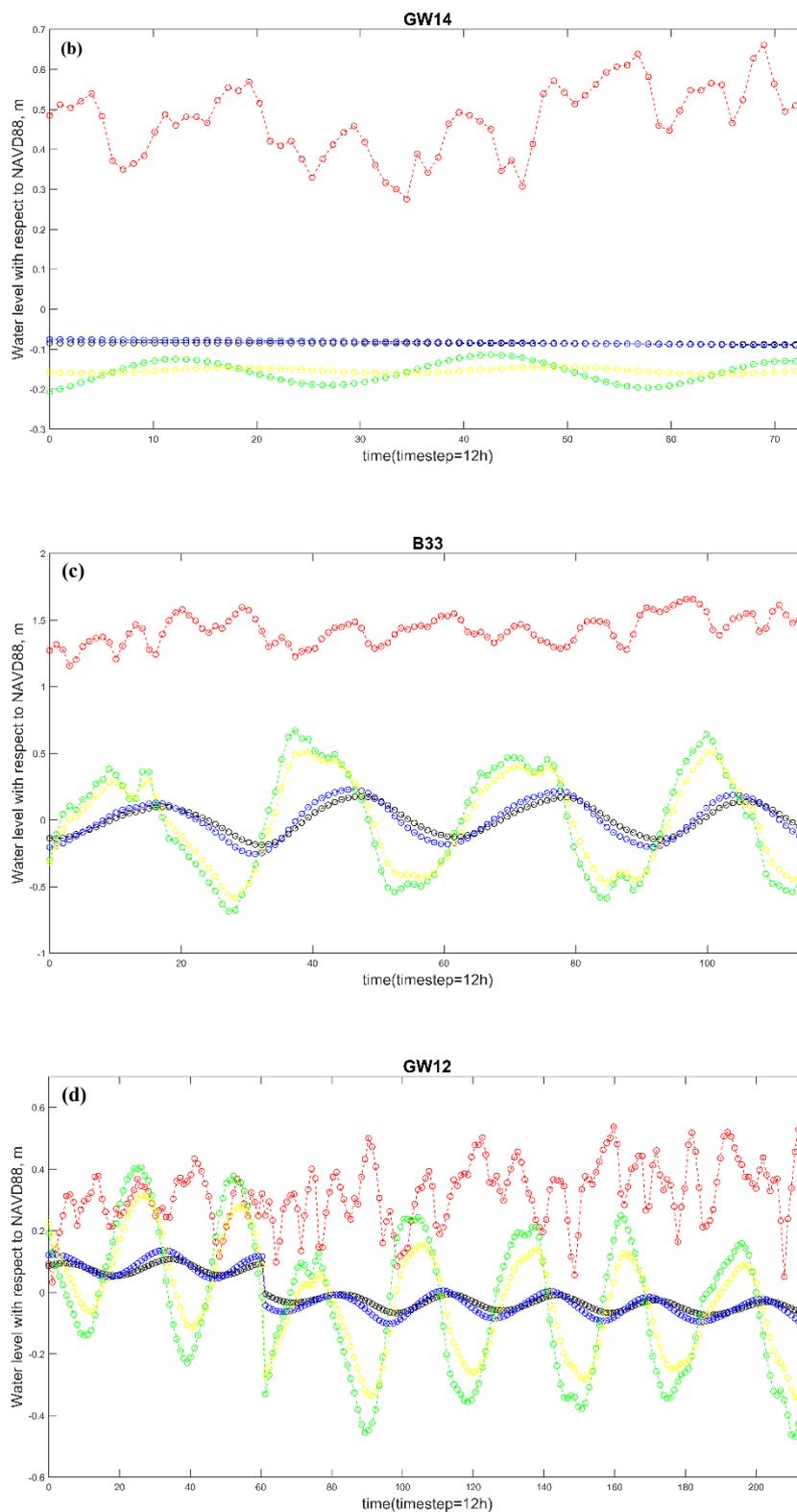


Figura 4-13: confronto tra dati osservati e simulati al variare del valore della conducibilità idraulica, (a) GW5, (b) GW14, (c) B33, (d) GW12

Dalle osservazioni dei dati in tabella e dei grafici si evince che l'errore maggiore è stato compiuto nella simulazione dei livelli piezometrici dei piezometri di osservazione B33 e GW14. Al variare della conducibilità idraulica aumenta l'ampiezza delle oscillazioni ed in generale il miglior riscontro è stato ottenuto utilizzando il valore della conducibilità ottenuto mediando i test di permeabilità in situ, pari a $7.09 \cdot 10^{-6}$. È stato calcolato l'indice CRM, coefficiente di massa residua:

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \cong 1.05 \quad (4.4)$$

Un valore positivo indica che il modello tende a sottostimare i valori; ciò è in parte dovuto all'assunzione di valori costanti del livello del fiume lungo la linea di costa, pari a quelli misurati dalla stazione The Battery. In realtà, il livello idrico in prossimità della costa di Hoboken dovrebbe essere maggiore, poiché l'area di studio si colloca a monte rispetto alla stazione meteorologica, e variabile nello spazio.

4.4 Simulazioni

In questa sezione vengono presentate le simulazioni, effettuate in stato stazionario considerando le condizioni attuali e possibili scenari futuri, utilizzando il modello e le condizioni presentate nel *Capitolo 3*. L'obiettivo delle simulazioni è quello di individuare le aree maggiormente soggette al rischio di risalita del livello di falda al di sopra del piano campagna, attraverso l'individuazione della profondità della superficie piezometrica. Di seguito si riporta la profondità della superficie piezometrica ($W,d(m)$), figura 4-14, rispetto al piano campagna considerando il livello del fiume massimo, medio e minimo misurato nel periodo di osservazione che si protrae da 01/05/2018 a 23/01/2019, tabella 4-4.

Tabella 4-4: livello minimo, medio e massimo del fiume Hudson

Water Level with respect to NAVD88 (m)		
Minimo	Medio	Massimo
-1.25	0.085	1.545

Inizialmente, sono state eseguite simulazioni allo stato stazionario dello stato attuale variando esclusivamente la condizione imposta dal fiume (figura 4-14). Il livello del fiume, tabella 4-4, è stato implementato come condizione al contorno del primo tipo o di Dirichlet, valore di carico idraulico costante, lungo il confine nord ed est dell'area di studio (vedasi figura 3-1); mentre lungo il confine ovest e sud (vedasi figura 3-1) sono state mantenute le condizioni rispettivamente di “no flow boundary” e carico idraulico costante pari alla media del carico idraulico misurato all'interno del piezometro B19, -0.42 m.

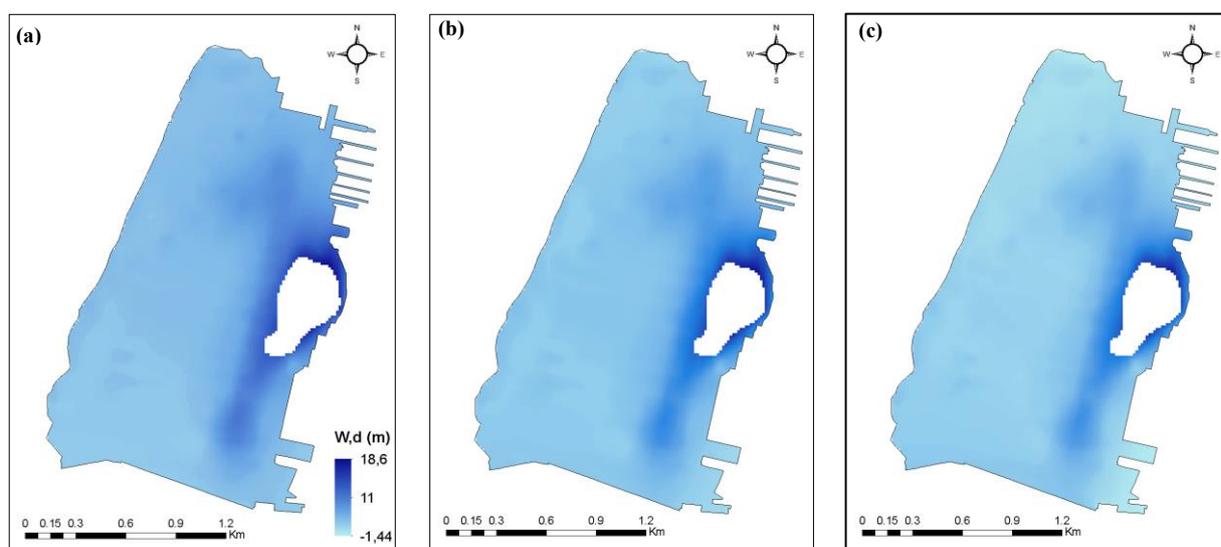


Figura 4-14: profondità della superficie piezometrica rispetto al piano campagna W,d (m), (a) livelli minimo del fiume, (b) livello medio, (c) livello massimo

In gran parte dell'area di studio, nella totalità degli scenari considerati (figura 4-14), il livello di falda è risultato essere superficiale; la soggiacenza varia tra 18.6 e -1.44 m e tende a diminuire all'aumentare della distanza dalla linea di costa. Si può notare una progressiva diminuzione della profondità della superficie piezometrica all'aumentare del livello del fiume. L'acquifero superficiale nell'area di Castle Point, caratterizzata da maggiore elevazione sul livello del mare rispetto l'area circostante, non risulta essere soggetto a flusso idrico sotterraneo; intorno a quest'area, la superficie piezometrica si attesta ad una maggiore profondità. Nelle condizioni di livello minimo e medio del fiume, -1.25 e 0.085 m, la soggiacenza mantiene un valore positivo; mentre nello scenario in cui è stata implementata la condizione di livello massimo del fiume pari a 1.545 m, figura 4-14 (c), sono stati riscontrati valori negativi, i quali indicano la presenza di aree soggette ad allagamento. In figura 4-15, vengono evidenziate le aree soggette alla risalita dell'acqua di falda al di sopra del piano campagna in condizioni di livello massimo del fiume ed

il livello idrico al di sopra del piano campagna, $W,l(m)$. Le aree soggette ad allagamento in condizioni di alta marea ricoprono il 6,66 % dell'area di studio; esse si collocano a sud lungo la linea di costa, zona residenziale, e nell'area nord-ovest, zona industriale-commerciale. Le simulazioni del livello di falda eseguite considerando come termine di ricarica l'afflusso meteorico di periodo di ritorno pari ad 1 e 10 anni non vengono riportate poiché la variazione del livello di falda è risultato essere trascurabile.



Figura 4-15.: aree soggette ad allagamento, considerando il livello massimo del fiume; con $W,l(m)$ viene indicato il livello idrico al di sopra del piano campagna riferito al datum NAVD88

Le simulazioni degli scenari futuri sono state eseguite allo stato stazionario considerando un incremento del livello idrico medio del fiume Hudson e del livello piezometrico medio misurato all'interno del piezometro di osservazione B19 (0.085 e -0.42 m) pari a 0.25, 0.5 ed 1 m; lungo il confine ovest è stata mantenuta la condizioni di assenza di flusso. Le proiezioni fanno riferimento all'anno 2100; in cui l'incremento di 0.25 m è stato ricavato dall'analisi del trend del fiume Hudson, *paragrafo 2.5*, mentre i valori di 0.5 ed 1 m fanno riferimento alle proiezioni di innalzamento di livello oceanico stimate dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Third Assessment Report considerando il peggior scenario di emissione di gas serra, la maggior sensibilità climatica e lo scioglimento dei ghiacciai [31]. In figura 4-16, si riportano le aree soggette ad allagamento, in cui con $W,l(m)$ viene indicato il livello idrico al di sopra del piano campagna; si può notare un incremento delle aree soggette ad allagamento nella zona sud lungo costa e lungo il confine nord dell'area di studio all'aumentare del livello del fiume.

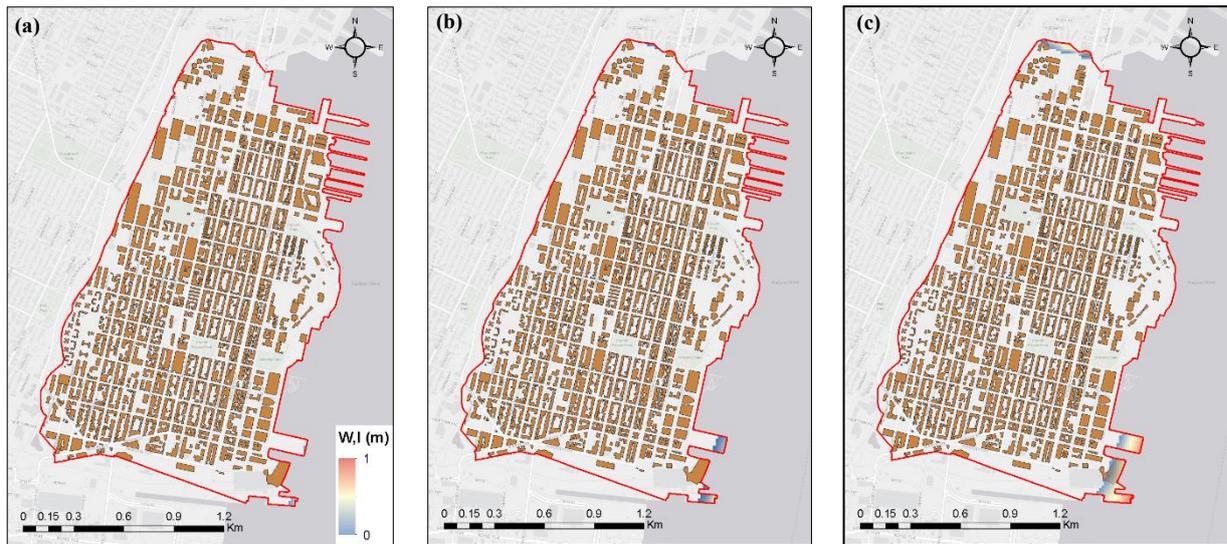


Figura 4-16: aree soggette ad allagamento, $W, l (m)$ indica il livello idrico al di sopra del piano campagna in riferimento al NAVD88, (a) innalzamento del livello del fiume pari a 25 cm, (b) innalzamento pari a 50 cm, (c) innalzamento pari ad 1 m

In figura 4-17, si riportano le aree soggette ad allagamento ed i livelli idrici al di sopra del piano campagna ottenuti ipotizzando la riparazione della quota parte del sistema fognario maggiormente danneggiato, contenuto nel sottobacino H1, per cui è stato individuato il maggior volume di infiltrazione giornaliero di acqua di falda, ed un contemporaneo aumento del livello del fiume pari ad 0.25, 0.5 ed 1 m.

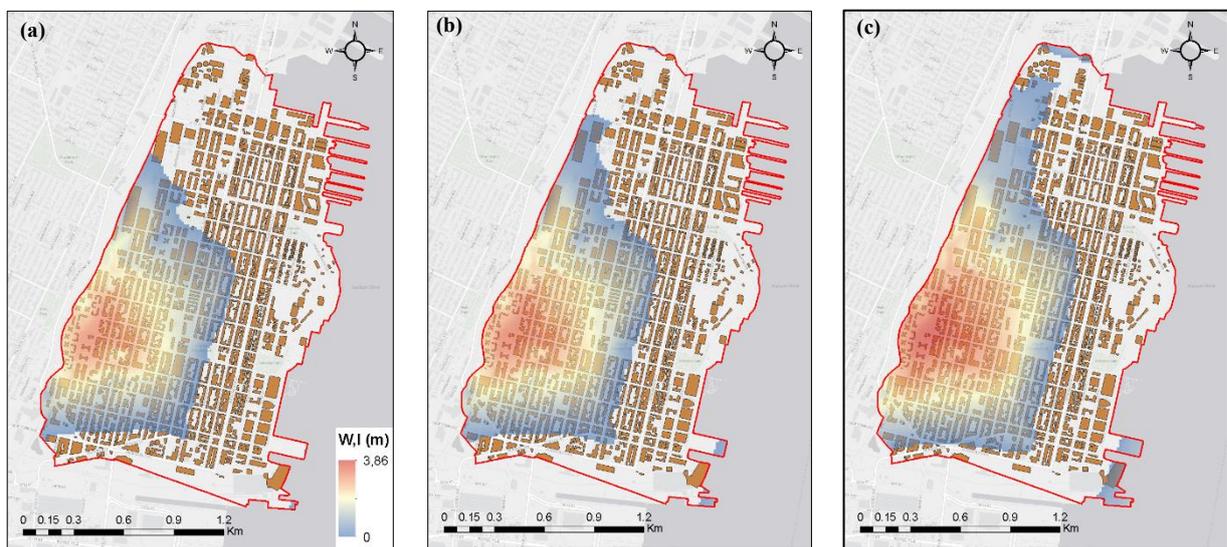


Figura 4-17: aree soggette ad allagamento, $W, l (m)$ indica il livello idrico in riferimento al NAVD88, in diversi scenari, considerando il termine di ricarica dovuto alla riparazione del sistema fognario contenuto nel sottobacino H1 (a) innalzamento del livello del fiume pari a 25 cm, (b) innalzamento pari a 50 cm, (c) innalzamento pari ad 1 m

La percentuale dell'area di studio soggetta a risalita superficiale di acqua di falda varia tra 0.002 e 1.53 % nello scenario in cui è stato considerato il solo incremento del fiume Hudson; mentre varia

tra il 43,2 e il 65,7 % nello scenario in cui è stata ipotizzata la contemporanea riparazione di parte del sistema fognario e l'innalzamento del fiume; queste aree saranno meidamente soggette ad allagamento. È da notare che la riparazione di parte del sistema fognario comporta un notevole aumento delle aree soggette al fenomeno di risalita superficiale nella zona ovest, area residenziale.

In gran parte dell'area studio, in ogni scenario simulato il livello di falda è risultato essere superficiale, specialmente nell'entroterra, poiché l'area di studio è caratterizzata da una bassa elevazione sul livello del mare che diminuisce allontanandosi dalla linea di costa. La copertura del suolo, caratterizzata da notevole urbanizzazione, comporta un basso tasso di infiltrazione dell'afflusso meteorico, cui consegue un'esigua influenza degli afflussi pluviometrici sull'innalzamento del livello di falda; questa situazione è comune in aree fortemente urbane, in cui prevale il deflusso superficiale rispetto all'infiltrazione [32]. È importante notare che il software utilizzato non è in grado di simulare il deflusso superficiale; per ovviare a questo limite si ricorrerà, in futuro, ad un accoppiamento del software MODFLOW e del software SWMM, quest'ultimo in grado di modellare il deflusso superficiale.

5 Conclusioni

Nel presente elaborato è stato presentato uno studio finalizzato alla modellazione del flusso sotterraneo di un acquifero superficiale in un'area urbano-costiera. Il modello è stato implementato per l'area di Hoboken (NJ, USA), che si colloca lungo l'estuario del fiume Hudson; quest'area che si attesta ad una bassa quota rispetto al livello del mare, durante eventi climatici estremi è stata soggetta ad ingenti fenomeni di allagamento. Per la comprensione delle dinamiche del flusso sotterraneo sono state eseguite misurazioni del livello di falda in piezometri di osservazione dislocati all'interno dell'area di studio. Sono state eseguite simulazioni atte ad individuare la profondità della superficie piezometrica rispetto al piano di campagna, nello stato attuale ed ipotizzando scenari futuri. È importante notare il ruolo svolto dal sistema fognario all'interno del modello, esso svolge un ruolo di fattore limitante nell'innalzamento del livello di falda a causa dell'infiltrazione di quota parte dell'acqua sotterranea al suo interno. Il livello di falda in ogni scenario considerato è risultato essere superficiale, in particolare nell'entroterra a causa di una diminuzione dell'elevazione del terreno; la soggiacenza tende a diminuire all'aumentare della distanza dalla linea di costa. Durante l'alta marea l'area di studio è risultata essere suscettibile a fenomeni di allagamento lungo la linea di costa e nell'area settentrionale. La riparazione del sistema fognario provoca la risalita dell'acqua di falda al di sopra del piano di campagna nelle aree che si attestano ad un minor quota rispetto al livello del mare. Gli eventi piovosi simulati hanno indotto una variazione del livello di falda trascurabile, a causa della forte urbanizzazione che ha ridotto notevolmente il tasso di infiltrazione in favore del deflusso superficiale. Il presente elaborato fornisce indicazioni sulle aree maggiormente suscettibili ai fenomeni di allagamento e su possibili scenari futuri.

Appendice A: specifiche tecniche dei trasduttori di pressione

In Tabella A-1 e A-2 si riportano le specifiche tecniche dello del sensore HOBO U20L (figura A1) introdotto nel *paragrafo 2.4 Monitoraggio del livello di falda*.



Figura A-1: trasduttore di pressione HOBO U20L, Water Level Loggers

Tabella A-1: sensore HOBO U20L-004 specifiche tecniche misure di pressione assoluta e del livello idrico [32]

Misure di pressione (assoluta) e del livello idrico

Range operativo	da 0 a 145 kPa; approssimativamente da 0 a 4 m di profondità della tavola d'acqua rispetto al livello del mare, o da 0 a 7 m ad un'altitudine di 3000 m.s.l.m
Pressione di rottura	310 kPa o 18 m di profondità
Accuratezza misura del livello idrico	Errore medio: $\pm 0.1\%$ FS, 0.4 cm Errore max: $\pm 0.2\%$ FS, 0.8 cm
Accuratezza misura di pressione	$\pm 0.3\%$ FS, 0.43 kPa errore max
Risoluzione	<0.04 kPa, 0.14 cm
Tempo di risposta	<1 s a temperatura stabile; l'accuratezza della misura dipende anche dal tempo di risposta nella misura della temperatura

Tabella A-2: sensore HOBO U20L-004 specifiche tecniche misure di temperatura [32]

Misure di temperatura

Range operativo	da -20° a 50 ° C
Accuratezza	± 0.44 ° C nel range che va da 0 ° a 50 ° C
Risoluzione	0.1 ° C a 25 ° C
Tempo di risposta	10 minuti in acqua

Appendice B: ricostruzione stratigrafica attraverso l'utilizzo del software ArcGIS

Di seguito si riporta una descrizione sintetica dei principali step seguiti per la ricostruzione dello strato superficiale e profondo:

- realizzazione dei confini dell'area di studio;
- realizzazione del raster DEM, digital elevation model, riferito al datum NAVD88, tramite interpolazione dello shapefile puntuale contenente i punti quotati;
- realizzazione dello shapefile puntuale Borings, in cui sono stati inseriti tutti i sondaggi a disposizione e la profondità del bottom dello strato di copertura e del top dello strato di fondo, tramite la funzione *Editor* → *Create New Features*. Di alcuni sondaggi erano note latitudine e longitudine, ed è stato possibile assegnare l'esatta locazione tramite il tool *Go to XY*, mentre per altri si è proceduto per confronto visivo, utilizzando le BaseMap presenti all'interno di ArcGis;
- assegnazione della quota del piano campagna al nuovo layer Borings, contenente i sondaggi, tramite il tool *ArcToolbox* → *Spatial Analyst Tools* → *Extraction* → *Extract Multi Values to Points*;
- separazione dei sondaggi che individuano la profondità del bottom dello strato di riempimento superficiale da quelli che individuano la profondità del top dello strato di fondo, tramite il tool *Extract Data*, in due nuovi shapefile puntuali;
- interpolazione delle profondità del basamento roccioso e dello strato di riempimento superficiale, al fine di ottenere due superfici che ne rappresentassero l'andamento all'interno dell'area di Hoboken;
- verifica di non sovrapposizione tra le superfici ottenute dall'interpolazione tramite il tool *ArcToolbox* → *Spatial Analyst Tools* → *Map Algebra* → *Raster Calculator*;
- creazione degli shapefiles strade, fabbricati e spazi verdi;
- assegnazione quote agli shapefile creati, considerando l'altezza di un fabbricato in media pari a 10 m e della strada pari a 0.1 m rispetto al piano campagna, mentre per gli spazi verdi si è considerata altezza pari al piano campagna;

- realizzazione della mappa di copertura unendo gli shapefile strade, fabbricati e spazi verdi utilizzando il tool *Geoprocessing* → *Merge*;
- conversione dello shape file mappa di copertura in file raster tramite il tool *ArcToolbox* → *Conversion Tools* → *Shapefile to Raster*.

Bibliografia

- [1] V. E. Post and A. D. Werner, "Coastal aquifers: Scientific advances in the face of global environmental challenges," *Journal of Hydrology*.
- [2] Milman, "Flooding from sea level rise threatens over 300,000 US coastal homes-study," *The Guardian*, 18 Giugno 2018.
- [3] V. Gornitz, T. W. White and R. Cushman, *Vulnerability of the U.S. to future sea level rise*, U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 1991.
- [4] K. Rotzoll and C. H. Fletcher, "Assessment of groundwater inundation as a consequence of sea-level rise," *Nature Climate Change*, 11 Novembre 2012.
- [5] C. Rosenzweig, W. Solecki, R. A. Blake, M. J. Bowman, V. Gornitz, K. H. Jacob, P. L. Kinney, H. Kunreuther, Y. Kushnir, R. M. Leichenko, N. Lin and G. J. Nordson, "New York City Panel on Climate Change 2015 Report," 2015.
- [6] H. A. Michael, V. E. Post, A. M. Wilson and A. D. Werner, "Science, society, and the coastal groundwater squeeze," *Water Resource Research*, vol. 53, 2017.
- [7] R. S. Trogrlic, J. Rijke, N. Dolman and C. Zevenbergen, "Rebuild by Design in Hoboken: A Design Competition as a Means for Achieving Flood Resilience of Urban Areas through the Implementation of Green Infrastructure," *WATER*, no. 553, Maggio 2018.
- [8] J. J. Bykowski, *Historic Waters: Re-imagining Hoboken's Engineered Landscape*, 2013.
- [9] J. Travis, "Scientists' Fears Come True as Hurricane Floods New Orleans," *Science AAAS*, 2005.
- [10] R. H. Kesel, "The decline in the suspended load of the Lower Mississippi River and its influence on adjacent wetlands," *Environmental Geology and Water Sciences*, 1988.
- [11] Stanford, "Surficial geology of the Weehawken and Central Park quadrangles, Bergen, Hudson, and Passaic Counties, New Jersey," *New Jersey Geological Survey*.
- [12] Stockton, New Jersey and the Stockton Formation, New Jersey Geological and Water Survey.

- [13] T. Liu, X. Su and V. Prigiobbe, "Groundwater-Sewer Interaction in Urban Coastal Areas," *Water*, 2018.
- [14] X. Su, T. Liu, B. Maryam and V. Prigiobbe, "Groundwater flooding of aging infrastructure and urban ground," *Submitted to Environmental Science and Pollution Research*, vol. 201X.
- [15] A. Di Molfetta and R. Sethi, *Ingegneria degli Acquiferi*, Torino: Springer, 2012.
- [16] "Administration, (NOAA) National Oceanic and Atmospheric," [Online]. Available: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750.
- [17] USGS, "<https://water.usgs.gov/ogw/modflow/mf2005.html>".
- [18] A. W. Harbaugh, "MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-The Ground Water Flow Process," *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*.
- [19] M. P. Anderson, W. W. Woessner and R. J. Hunt, *Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Trasport*, ELSEVIER, 2015.
- [20] M. G. McDonald and A. W. Harbaugh, "A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model," in *Techniques of Water-Resources Investigations oh the United States Geological Survey*, vol. 6, United States government printing offic, Washington, 1988.
- [21] A. Johnson, "Specific yield - compilation of specific yields for various materials," *U.S. Geological Survey Water Supply Paper* , no. 1662-D, 1967.
- [22] R. J. Winston, A. M. Al-Rubaei, G. T. Blecken and M. Viklander, "Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate - The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling," *Journal of Environmental Management*, 2015.
- [23] N.O.A. A. Administration, "NOAA's National Weather Service, Hydrometereological Design Studies Center, Precipitation Frequency Data Server (PFDS)," [Online]. Available: https://hdsc.nws.noaa.gov/hdsc/pfds/pfds_map_cont.html?bkmrk=nj.
- [24] R. Cronshey, "Urban Hydrology for Small Watersheds. Tech.rep., US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division," 1986.

- [25] NHTSA, "System Characterization Report for the Adam Street WWTP," 2018. [Online]. Available: https://www.nj.gov/dep/dwq/pdf/CSO_SystemCharacterization_NHTSAdamsStreet_20180701.pdf.
- [26] E. Caiaffa, SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI, Un percorso attraverso concetti e nozioni fondamentali per addentrarsi nel vasto mondo della Scienza della Informazione Geografica, ENEA(Ente per le Nuove tecnologie l'Energia e l'Ambiente), 2006.
- [27] V. Noti, *Geostatistica e interpolazione spaziale*.
- [28] P. De Zorzi and S. Barbizzi, *Caso di studio: l'applicazione della geostatistica nell'ambito del progetto SOILSAMP*, Roma, 2004.
- [29] "ArcGIS Pro," [Online]. Available: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/what-is-ebk-regression-prediction-.htm>.
- [30] K. Krivoruchko, *Empirical Bayesian Kriging, Implemented in ArcGIS Geostatistical Analyst*.
- [31] S. Rahmstorf, "A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise," *Science*, vol. 315, no. 5180, pp. 368-370, 2016.
- [32] "HOBO U20L Water Level Logger (U20L -0x) Manual".
- [33] L. B. Tin, N. Hoving, A. Hartmann, J. Ramirez-Marquez and V. Prigiobbe, "Method to assess and visualize the likelihood of sewer system failure," *Journal of Infrastructure System* 201X.
- [34] E. Rush, "Meet America's new climate normal: towns that flood when it's raining," *The Guardian*, 2018.
- [35] A. Joodavi, M. Zare, A. N. Ziaei and T. P. Ferrè, Groundwater management under uncertainty using a stochastic multi-cell model, *Journal of Hydrology*, 2017.
- [36] N.O.A.A. Administration, "NOAA, Tide and Currents, 8518750 The Battery, NY," [Online]. Available: <https://tidesandcurrents.noaa.gov/stationhome.html?id=8518750>.